



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 141584

PENGARUH VARIASI ARUS DAN KECEPATAN PENGELASAN TIG TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN BAJA TAHAN KARAT SS 316L

FAKHRI AULIA ABDILLAH
NRP 2713 100 108

Dosen Pembimbing :
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR – TL 141584

**PENGARUH VARIASI ARUS DAN
KECEPATAN PENGELASAN TIG
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
KEKERASAN BAJA TAHAN KARAT SS
316L**

FAKHRI AULIA ABDILLAH
NRP 2713 100 108

Dosen Pembimbing :
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 141584

**EFFECT OF CURRENT AND TRAVEL
SPEED VARIATION OF TIG WELDING ON
MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF
STAINLESS STEEL SS316L**

FAKHRI AULIA ABDILLAH
NRP 2713 100 108

Advisors
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik**

Pada

Bidang Studi Metalurgi Manufaktur

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

FAKHRI AULIA ABDILLAH

NRP 2713 100 108

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. (Pembimbing I)

Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGARUH VARIASI ARUS DAN KECEPATAN PENGELASAN TIG TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN BAJA TAHAN KARAT SS 316L

Nama : Fakhri Aulia Abdillah
NRP : 2713 100 108
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Salah satu jenis baja tahan karat yang banyak digunakan dalam dunia industri adalah baja tahan karat SS 316L yang merupakan baja tahan karat austenit. Salah satu metode pengelasan yang umum digunakan pada baja tahan karat tersebut adalah *Tungsten Inert Gas* (TIG) yang dapat mempengaruhi morfologi, struktur mikro, kekuatan, kekerasan, bahkan dapat mengakibatkan keretakan pada daerah las akibat *heat input* yang diberikan. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisa bagaimana hubungan antara struktur mikro dan nilai kekerasan pada baja tahan karat SS 316L setelah dilakukan pengelasan dengan arus dan kecepatan pengelasan yang bervariasi. Dari pengamatan makro diketahui perbedaan yang sangat jelas pada daerah *weld metal* dan *base metal*, serta didapatkan hasil lasan berbentuk tidak simetris. Pada pengujian metalografi diketahui fasa yang terbentuk adalah austenit dan ferrit yang tersebar pada tiga daerah las. Dari pengujian kekerasan didapatkan bahwa nilai kekerasan paling tinggi terdapat pada variasi kecepatan pengelasan 12 cm/min dengan arus 100 A. Proses pengelasan dan variasi yang diberikan tidak menimbulkan cacat apapun pada struktur mikro seperti presipitasi karbida maupun fasa sigma sehingga tidak mempengaruhi sifat kekerasan dan ketahanan korosi pada spesimen las.

Kata kunci: SS 316L, TIG, arus, kecepatan pengelasan, struktur mikro, kekerasan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

EFFECT OF CURRENT AND TRAVEL SPEED VARIATION OF TIG WELDING ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF STAINLESS STEEL SS 316L

Name : Fakhri Aulia Abdillah
NRP : 2713 100 108
Department : Materials and Metallurgical Eng.
Advisors : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

One of the stainless steel type that widely used in industry is SS 316L, which is austenitic stainless steel. One of the welding methods to join stainless steel is Tungsten Inert Gas (TIG), which can affect its morphology, micro structure, strength, hardness, and even lead to cracks in the weld area due to the given heat input. This research has a purpose to analyze the relationship between microstructure and hardness value on SS 316L stainless steel after TIG welding with the variation of current and travel speed. The macro observation shows very clear difference in the weld metal and base metal area, and the weld form is not symmetrical. The metallographic test shows the phase that formed in the specimen are austenite and ferrite, which were scattered in three welding areas. The hardness test shows that the highest hardness value is found in the variation of travel speed 12 cm/min with current 100 A. Welding process and variation given does not cause any defects in microstructure, such as carbide precipitation and sigma phase, means that it is not affect the hardness and corrosion resistance on all welded specimen.

Keywords: SS 316L, TIG, current, travel speed, microstructure, hardness.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir serta menyusun laporan tugas akhir dengan judul **“Pengaruh Variasi Arus dan Kecepatan Pengelasan TIG Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Baja Tahan Karat SS 316L”**. Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi mata kuliah tugas akhir yang menjadi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Departemen Teknik Material - Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik, diantaranya:

1. Kedua orang tua serta kedua adik penulis yang telah memberikan banyak doa, dukungan moril dan materiil, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi kepada penulis.
2. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. dan Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T. dan Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. yang telah memberikan banyak ilmu dan bimbingan spiritual selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI – ITS.
5. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI-ITS.
6. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi dan memberikan motivasi selama penulis

menjalani pendidikan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.

7. Tim Dosen Penguji seminar dan sidang tugas akhir, serta seluruh bapak dan ibu dosen dan karyawan di lingkungan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang tak kenal lelah dalam mendidik putra-putri terbaik bangsa ini.
8. Teman-teman Laboratorium Metalurgi yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.
9. Teman-teman seangkatan MT 15 khususnya Para Monster dan Kontrakan Anak Sholeh yang selalu memberikan canda dan tawa serta dukungan dalam berbagai kondisi yang dialami penulis.
10. Teman-teman BPH PI serta pengurus HMMT FTI-ITS 2015/2016 yang sudah menemani penulis dalam menjalani masa-masa terindah di kampus perjuangan ini.
11. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, Juli 2017
Penulis,

Fakhri Aulia Abdillah
2713 100 108

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Baja Tahan Karat.....	5
2.2 Baja Tahan Karat Seri 316L	8
2.2.1 Pengaruh Unsur Paduan.....	9
2.2.2 Diagram Fasa Fe-Cr-Ni	10
2.2.3 Struktur Mikro SS 316L	11
2.3 Presipitasi Fasa Intermetallik pada Baja Tahan Karat.....	13
2.4 Kekerasan	15
2.5 Pengelasan.....	18
2.5.1 Parameter Pengelasan	19
2.5.2 Siklus Termal	22
2.5.3 Pengelasan TIG	22
2.5.4 Sumber Tenaga.....	24
2.5.5 Gas Pelindung	26
2.5.2 <i>Filler</i> Metal	26
2.6 Penelitian Sebelumnya	27
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir	31
3.2 Metode Penelitian.....	31

3.3 Bahan Penelitian.....	32
3.4 Peralatan Penelitian	32
3.5 Tahapan Penelitian	33
3.5.1 Penentuan Parameter Pengelasan.....	33
3.5.2 Preparasi Spesimen.....	33
3.5.3 Pengelasan TIG	34
3.5.4 Preparasi Spesimen Pengujian	34
3.5.5 Proses Pengujian Spesimen	34
3.5.5.1 Pengujian Makro	34
3.5.5.2 Pengujian Metalografi	35
3.5.5.3 Pengujian Kekerasan	36
3.5.5.4 Pengujian XRD.....	38
3.6 Rancangan Penelitian	39
3.7 Jadwal Penelitian.....	40
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisis Data	41
4.1.1 Hasil Pengamatan Makro.....	41
4.1.2 Hasil Perhitungan Lebar <i>HAZ</i>	49
4.1.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro	50
4.1.4 Hasil Pengujian Kekerasan	71
4.1.5 Hasil Pengujian XRD	74
4.2 Pembahasan.....	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran	81
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN.....	xxv
BIODATA PENULIS.....	xlvi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram fasa baja kromium 18% Cr	6
Gambar 2.2 Diagram kesetimbangan baja tahan karat austenitik	10
Gambar 2.3 Stuktur mikro <i>austenitic stainless steel</i> 316L pada kondisi (a) setelah <i>solution annealing</i> dan (b) sebelum presipitasi	11
Gambar 2.4 Skema presipitasi fasa sigma pada baja tahan karat SS 316L <i>austenitic stainless steel</i>	13
Gambar 2.5 Penggunaan indentor pada masing-masing pengujian kekerasan	17
Gambar 2.6 Area struktural yang terbentuk pada (a) <i>fusion welding</i> dan (b) <i>nonfusion welding</i> antara logam murni (kanan) dengan paduan (kiri)	19
Gambar 2.7 Siklus termal las pada beberapa jarak dari batas las	22
Gambar 2.8 Pengelasan TIG	23
Gambar 2.9 Distribusi panas pada elektroda tungsten dan kerja pada setiap tipe arus pengelasan	25
Gambar 2.10 Pengaruh arus pengelasan pada morfologi secara makrografi di <i>stainless steel</i> 316 <i>butt-welding joint</i> dengan variasi arus (a) 80A; (b) 90A; (c) 100A; (d) 110A	28
Gambar 2.11 Grafik nilai kekuatan tarik pengelasan <i>stainless steel</i> 316 dengan variasi arus pengelasan 80A, 90A, 100A, dan 110 A	29
Gambar 2.12 Presipitasi fasa sigma di daerah ferrit pada <i>gauge length</i> dari sampel pengujian <i>creep</i> baja 316L yang diuji pada 550°C dengan beban 150 Mpa	30
Gambar 2.13 Presipitasi fasa sigma di grain boundaries pada <i>gauge length</i> dari sampel pengujian <i>creep</i> baja 316L yang diuji pada 550°C dengan beban 150 Mpa	30
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	31
Gambar 3.2 Mikroskop optik.....	36
Gambar 3.3 Alat uji kekerasan.....	37

Gambar 3.4 Posisi titik uji kekerasan pada daerah pengelasan	38
Gambar 3.5 Alat uji XRD	38
Gambar 4.1 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 80 A	41
Gambar 4.2 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 90 A	42
Gambar 4.3 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 100 A	42
Gambar 4.4 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 110 A	43
Gambar 4.5 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 80 A	43
Gambar 4.6 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 90 A	44
Gambar 4.7 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 100 A	44
Gambar 4.8 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 110 A	45
Gambar 4.9 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 80 A	45
Gambar 4.10 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 90 A	46
Gambar 4.11 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 100 A	46

Gambar 4.12 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 110 A	47
Gambar 4.13 Grafik perbandingan lebar <i>heat affected zone</i> (HAZ).....	50
Gambar 4.14 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	50
Gambar 4.15 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	51
Gambar 4.16 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	51
Gambar 4.17 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X	52
Gambar 4.18 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X.....	52
Gambar 4.19 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X	53
Gambar 4.20 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	53
Gambar 4.21 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	54
Gambar 4.22 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	54
Gambar 4.23 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	55

Gambar 4.24 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	55
Gambar 4.25 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	56
Gambar 4.26 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	56
Gambar 4.27 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	57
Gambar 4.28 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	57
Gambar 4.29 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X	58
Gambar 4.30 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X	58
Gambar 4.31 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X	59
Gambar 4.32 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	59
Gambar 4.33 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	60
Gambar 4.34 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	60

Gambar 4.35 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	61
Gambar 4.36 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	61
Gambar 4.37 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	62
Gambar 4.38 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	62
Gambar 4.39 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	63
Gambar 4.40 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X	63
Gambar 4.41 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X	64
Gambar 4.42 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X	64
Gambar 4.43 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X	65
Gambar 4.44 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	65
Gambar 4.45 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	66

Gambar 4.46 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X	66
Gambar 4.47 Hasil struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	67
Gambar 4.48 Hasil struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	67
Gambar 4.49 Hasil struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X	68
Gambar 4.50 Grafik perbandingan nilai kekerasan pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min	72
Gambar 4.51 Grafik perbandingan nilai kekerasan pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min	72
Gambar 4.52 Grafik perbandingan nilai kekerasan pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min	73
Gambar 4.53 Grafik perbandingan keseluruhan nilai kekerasan pada setiap daerah las SS 316L	73
Gambar 4.54 Grafik hasil pengujian XRD pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min	74
Gambar 4.55 Grafik hasil pengujian XRD pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min	74
Gambar 4.56 Grafik hasil pengujian XRD pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min	75
Gambar 4.57 Grafik hasil pengujian XRD pada daerah <i>weld metal</i> SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dengan arus 100 A	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kodifikasi Baja Tahan Karat	5
Tabel 2.2 Komposisi Kimia Baja Tahan Karat 316L	8
Tabel 2.3 Sifat Mekanik Baja Tahan Karat 316L	9
Tabel 2.4 Komposisi Kimia pada Beberapa Fasa yang Terlihat di SS 316L Menggunakan EDX (% wt)	12
Tabel 2.5 Komposisi Kimia ER 316/316L	26
Tabel 2.6 Sifat Mekanik ER 316/316L	27
Tabel 2.7 Spesifikasi Parameter Pengelasan TIG <i>Filler</i> ER 316/316L	27
Tabel 3.1 Parameter Pengelasan	33
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian	39
Tabel 3.3 Jadwal Penelitian	40
Tabel 4.1 Tabulasi Hasil Pengamatan Makro	48
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Lebar <i>HAZ</i>	49
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Kadar δ Ferrit pada Daerah <i>Weld</i> <i>Metal</i> Menggunakan Aplikasi ImageJ	69
Tabel 4.4 Tabulasi Hasil Struktur Mikro <i>HAZ</i> dan <i>Weld Metal</i>	70
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kekerasan SS 316L	71
Tabel 4.6 Tabulasi 3 <i>Peak</i> Tertinggi Hasil Pengujian XRD	76

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja tahan karat atau *stainless steel* merupakan baja paduan tinggi yang memiliki unsur utama Fe dengan penambahan unsur Cr lebih dari 10,5%. Hal ini membuat baja tahan karat memiliki sifat proteksi terhadap korosi yang sangat tinggi. Sifat ini diperoleh dari lapisan oksida (terutama krom) yang sangat stabil dan melekat pada permukaan serta melindungi baja tahan karat terhadap lingkungan yang sangat korosif. *Stainless steel* (SS) 316L merupakan salah satu jenis baja tahan karat *austenit* yang banyak digunakan sebagai bahan manufaktur peralatan maritim, peralatan industri seperti *piping*, *super heated tube*, dan berbagai kebutuhan lainnya. Baja ini umum digunakan pada temperatur hingga sekitar 650°C.

TIG (*Tungsten Inert Gas*) adalah salah satu metode pengelasan yang populer digunakan untuk menggabungkan material yang memiliki ketebalan tipis dalam industri manufaktur. Jenis pengelasan ini mampu mencapai hasil las berkualitas tinggi untuk baja tahan karat dan baja paduan *non-ferrous*. Sifat lasan pada baja *austenit* secara umum berbeda dengan logam dasar lainnya karena beberapa hal, antara lain dekomposisi karbida, serta pemisahan unsur yang terjadi selama proses pembekuan. Proses-proses tersebut dapat mengakibatkan perubahan pada struktur mikro, yang kemudian dapat mempengaruhi ketahanan korosi dan sifat mekanik material tersebut. Efek pengelasan TIG sendiri juga dapat mempengaruhi morfologi, struktur mikro, nilai kekuatan tarik, bahkan mengakibatkan *fracture* pada bagian las akibat *heat input* yang diberikan. Pengoptimalan variasi *heat input* dapat memberikan pengetahuan baru dari penelitian ini untuk aplikasi yang lebih baik dari *stainless steel*.

Saat ini, terdapat beberapa masalah yang terjadi pada saat proses pengelasan yang mempengaruhi kualitas dan sifat dari hasil sambungan las. Masalah yang ditimbulkan antara lain yaitu



keretakan, presipitasi karbida, serta munculnya fasa intermetallik yang dapat mengurangi sifat mekanik hasil pengelasan secara signifikan. Parameter pengelasan dan bahan yang tepat sangat dibutuhkan pada saat melakukan pengelasan untuk mencegah terjadinya masalah-masalah tersebut. Oleh karena itu, arus dan kecepatan pengelasan yang optimal dibutuhkan sebagai salah satu parameter pengelasan TIG baja tahan karat SS 316L untuk mengurangi cacat las dan dapat mencapai sifat mekanik yang lebih baik. Arus dan kecepatan pengelasan yang dapat mempengaruhi morfologi, struktur mikro, sifat kekerasan, serta bentuk sambungan las baja tahan karat SS 316L diuji pada penelitian kali ini.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh arus dan kecepatan pengelasan terhadap struktur mikro hasil pengelasan SS 316L dengan menggunakan metode TIG?
2. Bagaimana pengaruh arus dan kecepatan pengelasan terhadap sifat kekerasan hasil pengelasan SS 316L dengan menggunakan metode TIG?
3. Bagaimana hubungan antara struktur mikro dengan sifat kekerasan hasil pengelasan SS 316L dengan menggunakan metode TIG?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sudut pengelasan dianggap konstan.
2. Tegangan saat pengelasan dianggap konstan.
3. Pengaruh lingkungan sekitar pada saat pengelasan diabaikan.
4. Material yang digunakan dianggap homogen.



1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari diadakannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh arus dan kecepatan pengelasan terhadap struktur mikro hasil pengelasan SS 316L dengan menggunakan metode TIG.
2. Menganalisis pengaruh arus dan kecepatan pengelasan terhadap sifat kekerasan hasil pengelasan SS 316L dengan menggunakan metode TIG.
3. Menganalisis hubungan antara struktur mikro dengan sifat kekerasan hasil pengelasan SS 316L dengan menggunakan metode TIG.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk menjadi acuan dalam memprediksikan kekuatan hasil las, pemilihan material, mengetahui pengaruh variasi yang diujikan, serta pengembangan lain dalam bidang teknologi pengelasan di masa yang akan datang.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Tahan Karat

Baja tahan karat atau *stainless steel* merupakan baja paduan tinggi yang memiliki unsur utama besi dengan penambahan unsur Cr lebih dari 10,5%. Hal ini membuat baja tahan karat memiliki sifat proteksi terhadap korosi yang sangat tinggi. Sifat tahan korosi ini diperoleh dari lapisan oksida (terutama krom) yang sangat stabil dan melekat pada permukaan dan melindungi baja tahan karat terhadap lingkungan yang sangat korosif.

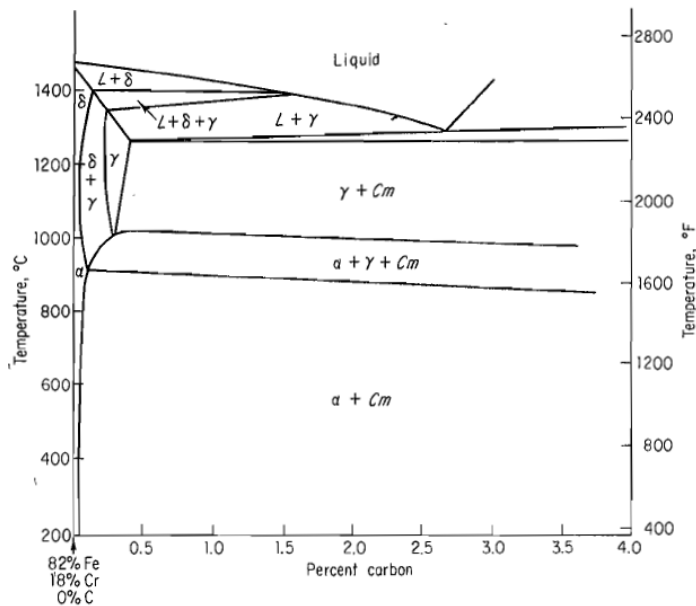
Pengkodean baja tahan karat berbeda dengan baja paduan jenis lainnya. Pengkodean menggunakan tiga angka, angka pertama menunjukkan grupnya, sedangkan angka kedua dan ketiga menunjukkan modifikasi paduannya. Tabel 2.1 menunjukkan beberapa contoh pengkodean baja tahan karat.

Tabel 2.1 Kodifikasi Baja Tahan Karat (Suherman, 1999)

Series	Groups
2xx	Chromium-Nickel-Manganese; non-hardenable; austenitic; non-magnetic
3xx	Chromium-Nickel; non-hardenable, austenitic, non-magnetic
4xx	Chromium; hardenable, martensitic, magnetic
5xx	Chromium, non-hardenable, ferritic, magnetic
6xx	Chromium; low chromium, heat resisting



Tingginya kadar kromium yang terdapat pada baja tahan karat menyebabkan diperlukannya diagram terner untuk menelitinya lebih lanjut. Kandungan kromium yang cukup tinggi akan menaikkan temperatur kritis dan juga mempersempit daerah austenit, jika dibandingkan dengan diagram besi-karbida besi. Kromium sebagai unsur penstabil ferrit akan memperkecil daerah austenit seiring peningkatan kadar kromium. Gambar 2.1 yaitu diagram fasa dengan kadar 18% Cr menunjukkan bahwa pada kadar karbon yang sangat rendah daerah austenit sudah sangat kecil. (Suherman, 1999)



Gambar 2.1 Diagram fasa baja kromium 18% Cr (Suherman, 1999)

Baja tahan karat memiliki resistansi tinggi terhadap korosi pada berbagai macam lingkungan. Elemen paduan utama adalah kromium dengan konsentrasi minimal 11% Cr. Ketahanan korosi

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



juga dapat ditingkatkan dengan tambahan nikel dan *molybdenum*. *Stainless steel* dibagi menjadi tiga kelas dengan dasar fase yang dominan dari mikrostrukturnya yaitu martensitik, feritik, dan austenitik. Tabel 2.1 menampilkan daftar beberapa *stainless steel* yang digolongkan oleh kelas, komposisi, sifat mekanik, dan aplikasinya. Jangkauan luas sifat mekanik digabung dengan ketahanan korosi yang baik membuat *stainless steel* sangat serba guna dalam pengaplikasiannya.

Martensitic stainless steel dapat menerima perlakuan panas yang sedemikian rupa. Maka dari itu, martensit merupakan *microconstituent* yang handal. Penambahan elemen paduan dengan konsentrasi secara signifikan dapat menyebabkan perubahan yang dramatis dalam fase besi karbida. Untuk baja tahan karat austenitik, fase austenit (γ) cukup luas untuk ke temperatur kamar. *Ferritic stainless steel* tersusun atas α -ferit (BCC).

Austenitic dan *ferritic stainless steel* dikeraskan dan dikuatkan dengan metode *cold work* karena kedua material tersebut tidak cocok untuk diberi pelakuan panas. *Austenitic stainless steel* merupakan yang paling tahan terhadap korosi karena komposisi kromium yang tinggi dan juga terdapat penambahan nikel. *Martensitic* dan *ferritic stainless steel* memiliki sifat magnetik sedangkan pada austenitik tidak.

Baja tahan karat austenitik adalah baja tahan karat paduan krom-nikel (tipe 3xx) dan krom-nikel-mangan (tipe 2xx). Berjenis austenitik, pada dasarnya bersifat non-magnetik dalam kondisi anil, dan tidak dikeraskan dengan perlakuan panas. Kandungan nikel dan krom nya lebih dari 23%. Baja tahan karat austenitik ini tidak bisa dengan mudah dilakukan *hot-worked* dan dapat dilakukan *cold-worked* dengan pengerjaan yang cepat. *Cold-working* dapat meningkatkan kekuatan mekanik dan baja tahan karat ini akan menjadi sedikit *magnetic* dibandingkan sebelumnya. Baja tahan karat ini sangat tahan terhadap guncangan (*shock*) dan sulit untuk dilakukan permesinan karena adanya unsur paduan sulfur dan selenium (pada tipe 303 dan 303s). Sifat baja paduan ini memiliki kekuatan pada temperatur tinggi dan tahan terhadap



scaling. Ketahanan korosi baja tahan karat austenitik ini biasanya lebih baik jika dibandingkan dengan baja tahan karat feritik ataupun martensitik. (Callister, 2007)

2.2 Baja Tahan Karat Seri 316L

Baja tahan karat seri 316L merupakan golongan baja *austenitic stainless steel* yang biasanya disingkat dengan SS. Baja tahan karat 316L merupakan baja austenitik Ni-Cr yang ditambahkan oleh Mo. Penambahan tersebut dapat meningkatkan ketahanan korosi serta meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi. Sifat mekanik pada baja ini hampir sama seperti baja tahan karat seri 304. Baja tipe ini dapat diaplikasikan pada saluran pembuangan kendaraan, bagian dari *furnace*, pengubah panas, bagian dari mesin jet, peralatan farmasi dan fotografi, tank, evaporator, peralatan untuk memproduksi kertas dan tekstil, serta komponen pada perkapalan. Komposisi kimia serta sifat mekanik dari baja tahan karat 316L berdasarkan ASTM A 240 ditunjukkan pada tabel 2.2 dan 2.3.

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Baja Tahan Karat 316L

Unsur	SS 316L (%)
C	0.03
Mn	2.00
P	0.045
S	0.03
Si	1.00
Cr	16.00-18.00
Ni	10.00-14.00
Mo	2.00-3.00
N	0.10
Fe	Balance



Tabel 2.3 Sifat Mekanik Baja Tahan Karat 316L

Material	UTS (Mpa)	Ys (Mpa)	Elongation in 2" (%)	Hardness (Brinnell)	Hardness (Rockwell)
SS 316L	485	170	40	217	95

Baja tahan karat seri 316L merupakan baja tahan karat austenit yang memiliki ketahanan korosi lebih baik dari seri 302 dan 304 karena memiliki kandungan Mo serta ketahanan *creep* yang tinggi. Baja 316L juga banyak digunakan dalam industri kimia, peralatan fotografi, serta peralatan makan. Baja tahan karat seri 316L merupakan versi baja seri 316 dengan kadar karbon yang lebih rendah sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya reaksi karbon dengan kromium yang dapat membentuk presipitasi karbida. (Avner, 1997)

2.2.1 Pengaruh Unsur Paduan

Tabel 2.2 menunjukkan bahwa baja tahan karat 316L memiliki beberapa unsur paduan, seperti karbon, mangan, sulfur, dan lain sebagainya. Berikut merupakan penjelasan mengenai pengaruh-pengaruh unsur paduan di atas terhadap sifat baja tahan karat 316L:

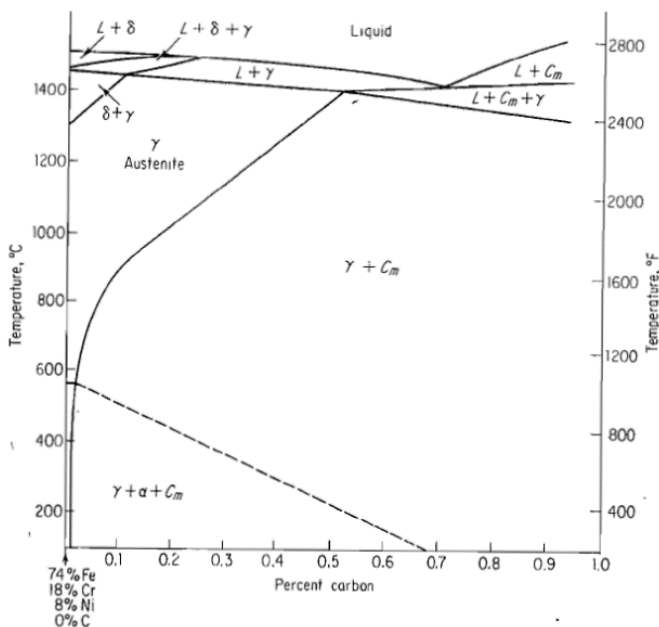
1. Karbon
Meningkatkan kekuatan mekanik
2. Mangan
Meningkatkan keuletan
3. Sulfur
Meningkatkan kemampuan *machinability*
4. Silikon
Meningkatkan ketahanan oksidasi, baik pada temperatur tinggi maupun rendah
5. Krom
Meningkatkan ketahanan korosi pada baja
6. Nikel
Meningkatkan keuletan dan ketangguhan baja



7. Molibdenum
Meningkatkan ketahanan korosi lokal dan seragam
8. Nitrogen
Meningkatkan kekuatan mekanik
(Outokompu, 2013)

2.2.2 Diagram Fasa Fe-Cr-Ni

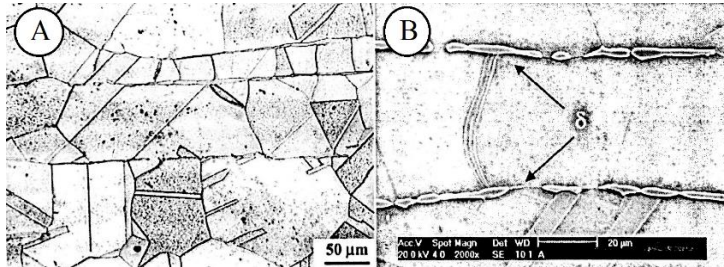
Baja tahan karat 316L memiliki fasa terneri dengan tiga unsur utama yang terdiri dari Fe, Cr, dan Ni. Pada diagram tersebut, dapat diketahui bahwa baja tahan karat 316L memiliki fasa austenit dan ferritik pada temperatur kamar. Diagram fasa Fe-Cr-Ni ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram kesetimbangan baja tahan karat austenitik
(Suherman, 1999)

2.2.3 Struktur Mikro SS 316L

Baja tahan karat 316L memiliki struktur mikro yang ditampilkan pada gambar 2.3. Dapat diamati bahwa struktur mikro SS 316L memiliki fasa rekristalisasi austenit yang mengandung beberapa *annealing twins* dan fasa delta ferrit yang memanjang.



Gambar 2.3 Struktur mikro *austenitic stainless steel* 316L pada kondisi (a) setelah *solution annealing* dan (b) sebelum presipitasi (Villanueva, 2006)

Annealing twins adalah tipikal dari struktur kristal FCC yang memiliki *low stacking fault energy*. Delta ferrit muncul dari proses solidifikasi. Fasa ferrit ada pada bentuk yang memanjang dan berbentuk paralel terhadap arah proses *rolling* di semua struktur mikronya. Volume fraksi dari delta ferrit yang didapatkan dengan menggunakan teknik *ferritoscope* adalah sebesar $0.26 \pm 0.03\%$. Jumlah fasa ini sangat sedikit ($<1\%$) dan tidak dapat diidentifikasi dengan menggunakan XRD. *Austenite lattice parameter* yang diperlihatkan oleh XRD adalah sebesar 0.3604 nm.

Pada saat fasa ferrit terdekomposisi melalui reaksi eutektoid (ferrit \rightarrow sigma + austenit), pada *grain boundaries* dan *triple points* terbentuk presipitasi melalui cara yang normal, yaitu melalui presipitasi yang berkelanjutan.

Komposisi kimia austenit, delta ferrit, dan fasa sigma telah diamati menggunakan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Hasil yang didapatkan ditampilkan pada tabel 2.4.



Tabel 2.4 Komposisi Kimia pada Beberapa Fasa yang Terlihat di SS 316L Menggunakan EDX (% wt)

Fasa	Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni
Austenit	0.54±0.02	2.6±0.1	17.4±0.2	2.0±0.1	64.9±0.3	12.4±0.1
Ferrit	0.51±0.05	4.7±0.1	23.9±0.2	1.51±0.04	63.2±0.2	6.11±0.02
Sigma pada Austenit	0.47±0.04	4.3±0.3	25±1	1.51±0.03	58±2	9±2
Sigma pada Ferrit	0.42±0.02	6.0±0.3	39.0±0.1	1.3±0.1	47±2	6.0±0.6

Delta ferrit kaya akan elemen pembentuk sigma seperti Cr, Mo, dan Si, apabila dibandingkan dengan austenit yang memfasilitasi terbentuknya presipitasi sigma. Komposisi kimia fasa sigma yang terbentuk di daerah ferrit berbeda dengan yang terbentuk di *grain boundaries (triple points)*. Pada delta ferrit, fasa sigma yang terbentuk kaya akan elemen pembentuk sigma seperti Si, Mo, dan Cr, namun sedikit memiliki Fe, Ni, dan Mn. Selanjutnya, pembentukan sigma melalui reaksi eutektoid berlangsung dengan mudah dan cepat. Kecepatan difusi antara Cr dengan Mo pada ferrit adalah hampir 100 kali lebih baik dibandingkan pada austenit. Berdasarkan perbandingan data tentang presipitasi yang terbentuk di tipe 316L, menunjukkan bahwa efek delta ferrit pada kinetik presipitasi fasa sigma adalah lebih kuat dibandingkan dengan perubahan komposisi yang kecil pada baja cor.

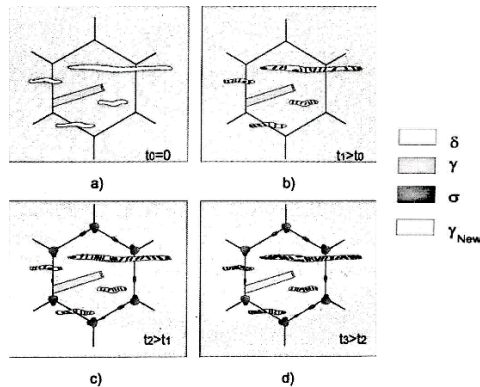
Presipitasi fasa sigma secara langsung pada austenit terjadi sangat lambat dan memakan banyak waktu. Beberapa hal yang menyebabkannya antara lain:

1. Fasa sigma memiliki solubilitas karbon dan nitrogen yang sangat rendah, sehingga presipitasi karbida dan nitrida seharusnya terjadi sebelum presipitasi sigma.
2. Difusi elemen pengganti sangat lambat di austenit

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

3. Fasa sigma berbeda dengan austenit dan nukleasinya sangat sulit.

Gambar 2.4 memperlihatkan tahapan presipitasi fasa sigma di berbagai daerah yang terdapat pada *stainless steel*.



Gambar 2.4 Skema presipitasi fasa sigma pada baja tahan karat SS 316L *austenitic stainless steel* (Villanueva, 2006)

2.3 Presipitasi Fasa Intermetallik pada Baja Tahan Karat

Presipitasi fasa intermetallik merupakan salah satu penyebab utama perusak sifat yang dimiliki oleh baja tahan karat. Sifat yang dirusak antara lain sifat mekanik, ketahanan korosi, dan kemampuan las. Salah satu jenis fasa intermetallik adalah fasa sigma. Fasa sigma dapat terpresipitasi pada lingkungan temperatur tinggi. Contohnya adalah pada saat melakukan *casting*, *rolling*, *welding*, *forging*, dan *aging*. Sangat sulit untuk mencegah presipitasi fasa sigma apabila kandungan Cr diatas rata-rata baja tahan karat pada umumnya (lebih dari 20%). Penambahan penstabil ferrit seperti Cr, Si, dan Mo pada baja tahan karat mengakibatkan terbentuknya fasa sigma secara cepat. Hal ini mengakibatkan transformasi dari delta ferrite ke fasa sigma dan dipercepat ketika Cr, Si, atau Mo didifusikan secara efisien kedalam delta ferrite. Penjelasan lebih lanjut fasa-fasa intermetallik adalah sebagai berikut:



a. Presipitasi Karbida Kromium

Presipitasi karbida terlebih dahulu terbentuk dibandingkan fasa lainnya pada proses aging. Presipitasi $M_{23}C_6$ ini terbentuk pada temperatur antara 900° - 700°C dalam waktu yang singkat. Tetapi dapat terjadi pula pada temperatur antara 700° - 550°C dengan waktu yang lebih lama.

Presipitasi karbida sebagian besar terbentuk di batas butir austenit/ferrit dengan diikuti reaksi eutektoid $\delta \rightarrow M_{23}C_6 + \gamma_2$. Presipitasi karbida ini akan membentuk austenit yang memiliki kadar kromium rendah. Austenit ini disebut *secondary* austenit.

b. Presipitasi Nitrida Kromium (Cr_2N)

Nitrogen merupakan unsur penstabil austenit yang kuat dan menyebabkan pergeseran daerah dua fasa ($\delta + \gamma$) pada temperatur tinggi. Nitrogen dalam larutan padat akan menghambat pembentukan fase intermetallik. Presipitasi Nitrida dalam jumlah yang sedikit terdapat di fasa austenit dengan selang temperatur dan pembentukan yang hampir bersamaan dengan $M_{23}C_6$.

c. Presipitasi fasa chi (χ)

Fasa chi (χ) biasa terdapat di baja tahan karat austenitik, ferritik, dan duplex, dan dapat menurunkan sifat ketahanan korosi dan sifat mekanik. Fasa ini hanya terlihat di diagram *ternary* Fe-Cr-Mo dan sistem *quaternary* Fe-Cr-Ni-Mo dan Fe-Cr-Ni-Ti. Dibandingkan dengan fasa sigma, fasa ini memiliki lebih banyak molibdenum (minimal kandungan sekitar 2 wt%) dan lebih sedikit kromium.

Pada umumnya fasa chi terbentuk pada temperatur antara 900° dan 600°C di batas butir ferrit dan austenit dan juga ferrit dan ferrit. Penelitian mengenai fasa chi ini terbilang masih sedikit dibandingkan dengan fasa sigma, hal ini terjadi karena jumlah fasa yang terbentuk lebih sedikit dibandingkan dengan fasa sigma. Meskipun demikian, keberadaan fasa ini telah dapat merusak sifat baja tahan karat.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



d. Presipitasi fasa sigma (σ)

Fasa sigma memiliki struktur tetragonal dengan 30 atom per unit. Presipitasi fasa sigma dapat terjadi pada baja tahan karat austenitik, ferritik, maupun duplex. Fasa sigma menyebabkan penurunan ketangguhan dan ketahanan korosi. Ketahanan impak juga menurun sejalan dengan peningkatan jumlah fasa sigma. Sejumlah 1% fasa sigma menyiratkan penurunan ketahanan impak sekitar 50% dari kondisi inisial (*solution annealed* dan *quenched*).

e. *Alpha prime* (α')

Penggetasan fasa ferrit pada baja tahan karat ferritik dan duplex disebabkan perlakuan panas pada temperatur 475°C. Faktor penyebab penggetasan ini adalah adanya fasa alpha prime yang terbentuk pada temperatur antara 550 dan 300°C. Fasa alpha prime yang memiliki struktur atom BCC, struktur yang sama dengan ferrit, mengandung kromium dan besi. Fasa ini memiliki ukuran yang kecil, antara 20 dan 200 Å dan memiliki sifat ketahanan *coarsening*, meskipun diberikan dalam waktu yang lama. Kehadiran fasa alpha prime ini berdampak pada sifat mekanik dan korosi. Selain itu, berdampak pada sifat kelistrikan, berat spesifik, dan *coarsive force*. Perubahan fisik ini dapat dihilangkan dengan annealing pada temperatur 600° C selama 1 jam.

Kekerasan, *yield stress*, dan kekuatan *tensile* akan meningkat. Namun, ketahanan impak menurun dengan adanya fasa alpha prime ini. Adanya fasa alpha prime memiliki dampak terhadap ketahanan korosi. Berdasarkan penelitian, kehadiran fasa ini akan menurunkan ketahanan korosi di dalam larutan asam nitric yang mendidih. Ketahanan terhadap korosi *pitting* dapat menurun akibat adanya fasa ini. (Callister, 2013)

2.4 Kekerasan

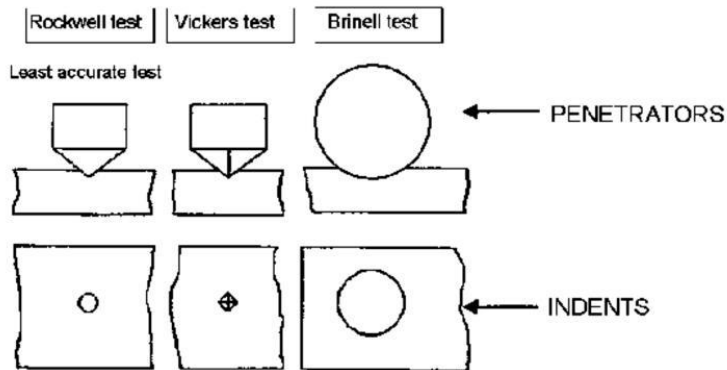
Salah satu sifat mekanik yang penting untuk diperhatikan pada setiap material adalah kekerasan (*hardness*). Kekerasan adalah ukuran dari ketahanan material untuk bertahan pada deformasi plastis. Pengujian kekerasan dahulu adalah berdasarkan



unsur penyusun material dengan skala yang dibuat untuk menguji kekuatan material satu untuk merusak material lainnya yang lebih halus. Awalnya dibuatlah pengukuran secara kualitatif dengan menggunakan skala Mosh, yang diatur antara 1 dari yang paling lunak menuju ke 10 yang paling keras. Pengukuran secara kualitatif tersebut telah dikembangkan selama bertahun-tahun dengan menggunakan indenter kecil yang ditekan pada permukaan material yang diuji, dengan kondisi beban yang telah diatur. Ukuran kedalaman dari hasil indentasi tadi merupakan *hardness number*. Semakin lembut suatu material dan titik indentasinya makin besar dan dalam, maka nilai kekerasannya akan kecil. Uji kekerasan dilakukan lebih sering daripada uji mekanik yang lain karena:

1. Sempel dan tidak mahal – biasanya tidak membutuhkan spesimen spesial yang harus dipreparasi, dan biaya tesnya sangat murah
2. Pengujian tidak merusak – spesimen uji tidak akan patah ataupun terdeformasi
3. Sifat mekanik lain mungkin butuh data kekerasan, seperti contohnya uji tarik

Beberapa jenis skala digunakan dari kombinasi indenter yang digunakan dan beban yang diberikan pada material. Perbedaan indenter menjadi alasan mengapa metode pencarian nilai kekerasan dapat dilakukan dengan beberapa metode. Berikut merupakan perbandingan ketiga indenter pada metode yang telah disebutkan diatas pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Penggunaan indenter pada masing-masing pengujian kekerasan (Dieter, 1988)

Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa indenter yang digunakan pada *rockwell test* berupa kerucut intan, sementara *brinell test* menggunakan indenter berupa bola baja, dan *vickers test* berupa intan yang cukup kecil dan mempunyai geometri seperti piramid.

1. Brinell

Uji kekerasan brinell berupa pembentukan lekukan pada permukaan logam dengan memakai bola baja berdiameter 10 mm dan diberi beban 3000 kg. Untuk bahan lunak, beban dikurangi hingga 500 kg agar tidak terjadi jejak yang terlalu dalam. Sementara untuk bahan yang keras, menggunkan karbida tungsten untuk memperkecil perhitungan uji kekerasan brinell

2. Vickers

Uji kekerasan vickers menggunakan indenter yang berupa piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besarnya sudut antara permukaan-permukaan piramid ang saling berhadapan adalah 136° . Sudut ini dipilih karena mendekati sebagian besar nilai



perbandingan yang diinginkan antara diameter lekukan dan diameer bola.

3. Rockwell

Uji kekerasan rockwell menggunakan kedalaman indentasi pada beban yang konstan sebagai ukuran kekerasan. Mula-mula diterapkan beban kecil sebesar 10 kg untuk menenmpatkan benda uji. Hal ini akan memperkecil jumlah preparasi permukaan yang dibutuhkan serta memperkecil kecenderungan untuk terjadi penumbukan ke atas. (Callister, 2013)

2.5 Pengelasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan dua bahan dengan jenis dasar yang sama melalui pembentukan ikatan kimia primer dan sekunder di dasarkan pada gabungan panas dan tekanan. (Messler, 1999)

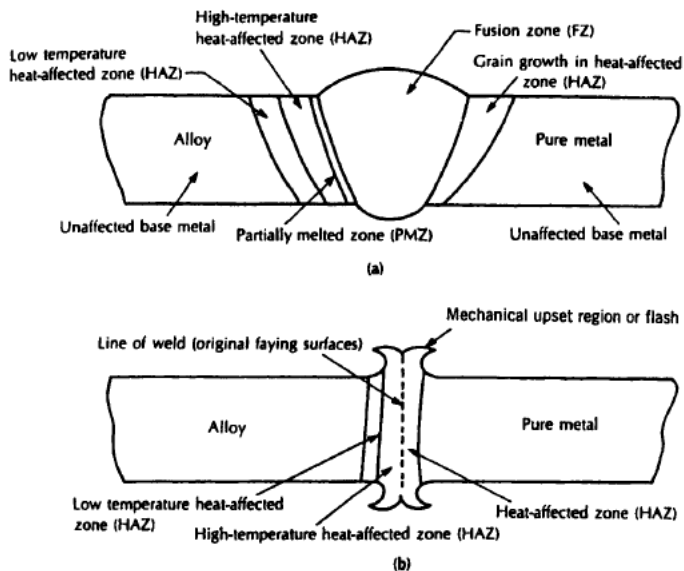
Menurut Ibrahim Khan, pengelasan adalah proses penyambungan secara permanen dua material melalui peleburan lokal yang di dasarkan pada perpaduan temperatur, tekanan dan kondisi metalurgi dari bahan.

Sedangkan menurut DIN (*Deutsche Industric Normen*), pengelasan adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam maupun logam paduan yang dilakukan pada keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain, pengelasan adalah penyambungan setempat dari logam dengan menggunakan energi panas, dengan atau tanpa tekanan, atau hanya tekanan, dengan atau tanpa menggunakan kawat las.

Dengan adanya energi panas, maka pada lokasi penyambung, logam akan melebur, menyebabkan adanya interaksi dengan logam lain. Pada pengelasan tahanan listrik, penyambungan dilakukan dengan memadukan antara enrgi panas dan tekanan yang dibangkitkan oleh tahanan listrik.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Proses pelelehan logam pada daerah lasan dan elektrode dengan sistem pendinginannya menyebabkan adanya proses perlakuan panas yang berakibat pada perubahan struktur mikro pada daerah sekitar lasan. Pada sambungan las, dapat dibedakan menjadi tiga daerah, yakni daerah lebur (*fusion zone*), daerah yang terpengaruh panas (*heat affected zone*=HAZ), dan daerah yang tidak terpengaruh panas pada logam asli (*unaffected zone*). (Suwarno, 2000)



Gambar 2.6 Area struktural yang terbentuk pada (a) *fusion welding* dan (b) *nonfusion welding* antara logam murni (kanan) dengan paduan (kiri) (Messler, 1999)

2.5.1 Parameter Pengelasan

Parameter pada proses pengelasan suatu material merupakan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap hasil las. Tidak hanya elektroda yang akan mempengaruhi pengelasan pada material. Namun, beberapa parameter pengelasan juga akan mempengaruhi kualitas hasil lasan seperti tegangan, arus, dan



kecepatan pengelasan, yang akan membuat suatu hubungan yang menghasilkan energi pengelasan, yakni *heat input* (HI) yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$H = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{V} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

H = *Heat Input* (HI) (kJ/mm)

E = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

V = Kecepatan pengelasan (mm/s)

η = Efisiensi pengelasan

Besar *heat input* mempengaruhi lebar HAZ yang dapat diketahui secara teoritis dengan menggunakan rumus berikut:

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4.13 \rho C t Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_o} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

C = Panas spesifik dari logam padat (J/g°C)

ρ = Massa jenis dari material (g/mm³)

t = Tebal dari *sheet* atau *plate* (mm)

To = Temperatur mula-mula dari *sheet* atau *plate* (°C)

Tm = Temperatur lebur (°C) (khususnya temperatur liquid yang akan dilas)

Tp = *Peak temperature* (°C) pada jarak (mm) dari batas sambungan las. Persamaan *peak temperature* ini tidak dapat digunakan pada titik-titik di dalam *weld metal*, hanya daerah HAZ saja.

Pengaruh dari parameter tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



a. Arus

Arus las berpengaruh pada proses pelelehan dan penyambungan logam. Semakin besar arus yang diberikan maka akan semakin cepat proses pelelehan dan penyambungan yang terjadi. Akan tetapi hal ini dapat mengakibatkan semakin besarnya *Heat Affected Zone* (HAZ), persentase sambungan las dan perubahan struktur mikripada daerah sambungan. Sebaliknya bila arus kecil maka proses pelelehan dan penyambungan tidak dapat terjadi.

b. *Travel Speed*

Kecepatan pengelasan didefinisikan sebagai laju perjalanan elektroda sepanjang sambungan. Kecepatan pengelasan tergantung pada jenis elektroda, diameter elektroda, bahan yang dilas, geometri sambungan, ketelitian sambungan, dan lain sebagainya. Kecepatan pengelasan tidak memiliki hubungan dengan tegangan, namun berbanding lurus dengan arus yang digunakan pada proses pengelasan. Karena itu, pengelasan yang cepat memerlukan arus yang tinggi. (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)

Dengan masukan panas (*heat input*) dari suatu pengelasan semakin tinggi, maka temperatur puncak yang diperoleh akan semakin tinggi. Pada daerah *HAZ* semakin tinggi masukan panas maka daerah *HAZ* akan semakin lebar dan akan tumbuh kristal dengan cepat yang membentuk butir yang besar dikarenakan laju pendinginan yang lambat. Struktur butiran yang besar akan mempengaruhi kekuatan hasil lasan menjadi lebih rendah.

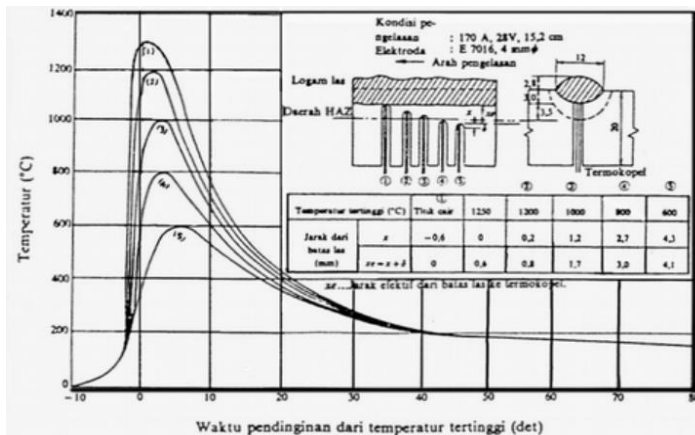
Besarnya arus pengelasan yang diperlukan tergantung pada diameter elektroda, tebal bahan yang dilas, jenis elektroda yang digunakan, geometri sambungan, diameter inti elektroda, posisi pengelasan. Daerah las mempunyai kapasitas panas tinggi maka diperlukan arus yang tinggi. Arus las merupakan parameter las yang langsung mempengaruhi penembusan dan kecepatan pencairan logam induk. Makin tinggi arus las makin besar penembusan dan kecepatan pencairannya. Besar arus pada pengelasan mempengaruhi hasil las bila arus terlalu rendah maka perpindahan cairan dari ujung elektroda yang digunakan sangat



sulit dan busur listrik yang terjadi tidak stabil. Panas yang terjadi tidak cukup untuk melelehkan logam dasar, sehingga menghasilkan bentuk rigi-rigi las yang kecil dan tidak rata serta penembusan kurang dalam. Jika arus terlalu besar, maka akan menghasilkan manik melebar, butiran percikan kecil, penetrasi dalam serta penguatan matrik las tinggi. (Santoso, 2006)

2.5.2 Siklus Termal

Siklus termal las adalah proses pemanasan dan pendinginan yang terjadi di daerah lasan. Lamanya pendinginan dalam proses pengelasan sangat mempengaruhi hasil akhir dari pengelasan tersebut. Fenomena siklus thermal pada pengelasan dapat dilihat pada gambar 2.7.



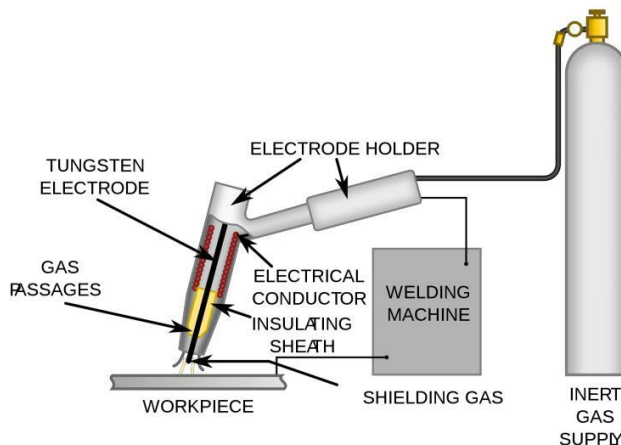
Gambar 2.7 Siklus termal las pada beberapa jarak dari batas las (Messler, 2004)

2.5.3 Pengelasan TIG

TIG (*Tungsten Inert Gas*) berasal dari Eropa dan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) berasal dari Amerika. Keduanya mempunyai pengertian yang sama yaitu metode pengelasan listrik

yang menggunakan elektroda tidak terkonsumsi. Elektroda ini hanya digunakan untuk menghasilkan busur listrik. Bahan penambah berupa *filler (rod)* digunakan untuk mencegah oksidasi dengan menggunakan gas mulia (seperti Argon, Helium, Ferron) dan karbon dioksida sebagai gas lindung. Metode pengelasan ini dapat digunakan dengan atau tanpa bahan penambah. Proses pengelasan ini menggunakan gas lindung untuk mencegah terjadinya oksidasi pada bahan las yang panas.

Busur nyala dihasilkan dari arus listrik melalui konduktor dan mengionisasi gas pelindung. Busur terjadi antara ujung elektroda tungsten dengan bahan induk. Panas yang dihasilkan busur langsung mencairkan *base metal* dan juga logam las yang berupa kawat las. Pencairan kawat las dilaksanakan di ujung kawat las sambil proses pengelasan berjalan. (*German Development Service, 2000*)



Gambar 2.8 Pengelasan TIG (DED, 2012)

Pengelasan jenis ini dapat digunakan untuk pengelasan aluminium, magnesium, *stainless steel*, titanium, tembaga dan paduannya, serta logam dengan ketebalan berbeda dalam baja ringan. Pengelasan ini menghasilkan mutu



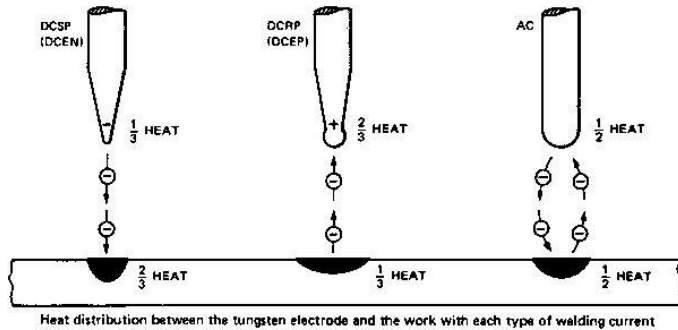
yang tinggi pada baja *ferrous* dan non *ferrous*. Apabila dilakukan pengelasan yang tepat, maka pengotor yang terdapat dari atmosfer dapat dihilangkan.

Keuntungan pada proses pengelasan jenis ini adalah dapat diaplikasikan pada material yang sangat tebal ataupun pada plat tipis, dan mampu menampilkan hasil lasan yang berkualitas. Oleh karena itu, pengelasan ini banyak digunakan secara luas, seperti pada pengelasan pipa. Hasil dari pengelasan TIG memiliki kemampuan untuk mengatasi masalah pada sambungan las. Kecepatan las yang rendah memudahkan pengamatan pada *welder* sehingga mudah untuk mengendalikan logam las selama proses pengisian dan penyatuan.

Sementara itu, kelemahan pada pengelasan ini terdapat pada laju pengisian yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis pengelasan lainnya. Untuk menghasilkan pengelasan yang baik, dibutuhkan daerah sambungan yang lurus. Selain itu, pada pengelasan TIG harus dihilangkan terlebih dahulu kotoran-kotoran yang ada di sekitar spesimen yang akan di las agar terhindar dari porositas dan cacat-cacat las yang lainnya. Kecepatan udara juga harus diperhatikan. Karena jika kecepatan udara di daerah sekitar pengelasan tinggi, maka akan membuat perlindungan dari gas inert TIG menjadi berkurang sehingga hasil pengelasannya tidak maksimal.

2.5.4 Sumber Tenaga

Pengelasan ini dapat dilakukan baik dengan arus AC maupun DC. Penentuan antara AC dengan DC didasari oleh material apa yang akan dilas. Ada 3 tipe dari arus pengelasan, atau polarisasi, yang bisa diterapkan pada pengelasan TIG. Setiap tipe arus listrik memiliki keistimewaan tersendiri yang membuatnya memiliki spesifikasi yang lebih diperlukan. Perbedaan utama pada arus tersebut adalah pada distribusi panas dan derajat busur.



Gambar 2.9 Distribusi panas pada elektroda tungsten dan kerja pada setiap tipe arus pengelasan (German Development Service, 2012)

Berdasarkan gambar di atas, didapatkan 3 tipe, yaitu DCEP, DCEN, serta AC. Berikut penjelasan dari ketiganya:

1. *Direct Current Electro Negative (DCEN)*

DCEN juga biasa disebut dengan *Direct-Current Straight Polarity* (DCSP), benda kerja yang akan dilas dihubungkan dengan kutub positif (+) sementara elektrodanya disambungkan pada kutub negatif (-) pada mesin las DC. Polaritas DCEN menghasilkan pencarian material yang lebih banyak dibandingkan elektrodanya. Sehingga memiliki hasil pengelasan yang dalam.

2. *Direct Current Electro Positive (DCEP)*

Benda kerja yang akan dilakukan pengelasan dihubungkan dengan kutub negatif (-) dan elektrodanya dihubungkan pada kutub positif (+) pada mesin las DC. Polaritas DCEP akan menghasilkan pencairan elektroda yang lebih banyak daripada material nya. Sehingga dapat menghasilkan hasil lasan yang dangkal.

3. *Alternating Current (AC)*

AC ini merupakan arus listrik yang besar dan arahnya arus dapat berubah secara bolak-balik. AC ini merupakan setengah DCEP dan setengah DCEN. Bentuk



gelombang dari arus ini berupa gelombang sinusoida. Hal ini disebabkan karena arus ini memungkinkan terjadinya perpindahan energi yang paling efisien.

2.5.5 Gas Pelindung

Untuk mencegah pengotor pada lasan dan kemunduran elektroda, gas pelindung harus dapat mencegah pengotor dari atmosfer pada lasan dan tidak bereaksi pada lelehan atau mengeraskan *weld metal* atau elektroda tungsten. Berikut merupakan tipe gas pelindung yang digunakan untuk TIG:

1. Argon, paling banyak digunakan
2. Helium, dapat memberikan penetrasi dan *heat input* yang lebih baik. Gas ini lebih mahal dari argon, karena terkadang menggunakan campuran 5% He dan 95% Ar untuk pengelasan *stainless steel*.

2.5.6 Filler Metal

Filler metal merupakan material yang di tambahkan dengan tujuan untuk mengisi kekosongan diantara dua logam yang akan di sambung. *Filler metal* yang paling banyak digunakan dalam proses pengelasan, yaitu *welding rods* dan *welding electrodes*. Sesuai dengan AWS D.5.22. dan AWS A5.9, pada tabel 2.5, 2.6, dan 2.7 terdapat sistem klasifikasi elektroda yang mengikuti pola.

Tabel 2.5 Komposisi Kimia ER 316/316 L (AWS D. 5.22)

Weight %	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Mo	Cu
ER 316/ER 316L	0.04-0.08	1.0-2.5	0.30-0.65	18-20	11-14	0.03 max	0.03 max	2-3	0.75 max



Tabel 2.6 Sifat Mekanik ER 316/316 L (AWS D 5.22.)

Material	Ultimate Tensile Strength		Offset Yield Strength 0.2 %		Elongation (%)
	Psi	MPa	Psi	MPa	
ER 316 / ER 316L	84,100	580	58,000	400	38

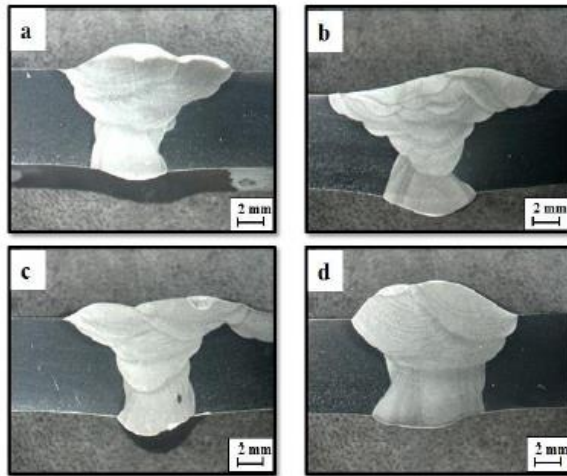
Tabel 2.7 Spesifikasi Parameter Pengelasan TIG *Filler* ER 316/316L (AWS A5.9)

Diameter Kawat <i>Filler</i> (inch)	Range Arus (A)	Range Tegangan (V)	Gas Pelindung
.035	60-90	12-15	Argon 100%
.045	80-110	13-16	Argon 100%
1/16	90-130	14-16	Argon 100%
3/32	120-175	15-20	Argon 100%

Elektroda dibuat dari tungsten dan mengandung sedikit Thorium atau Zirconium. Penambahan ini membuat kemampuan busur yang lebih baik dan lebih stabil. Elektroda tungsten Thoriated digunakan untuk pengelasan DC. Sementara Elektroda Zirconiated tungsten digunakan untuk pengelasan AC dan dapat digunakan untuk paduan Aluminium beserta paduannya dan Magnesium beserta paduannya. (Dadang, 2013)

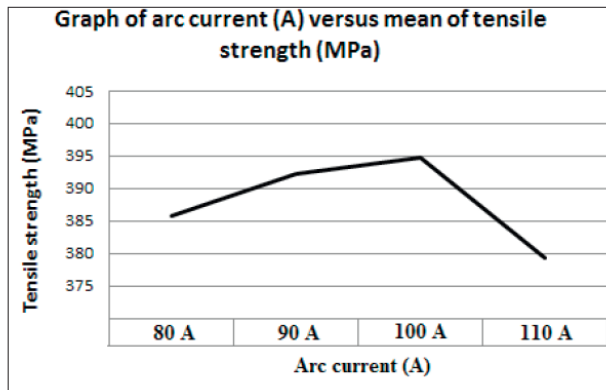
2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang dilakukan oleh Navid Moeslemi dan Norizah Redzuan tentang “*Effect of Current on Characteristic for 316 Stainless Steel Welded Joint Including Microstructure and Mechanical Properties*” yang menunjukkan hasil proses pengelasan pada stainless steel 316 yaitu dengan meningkatnya arus pengelasan maka berpengaruh terhadap peluasan lebar dan kedalaman daerah lasan (*weld pool*) seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Pengaruh arus pengelasan pada morfologi secara makrografi di *stainless steel 316 butt-welding joint* dengan variasi arus (a) 80A; (b) 90A; (c) 100A; (d) 110A. (Moslemi, et al. 2015)

Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan hasil kekuatan tarik (*tensile strength*) dengan variasi arus pengelasan dan mendapatkan hasil seperti yang ditampilkan pada gambar 2.11. Dapat dilihat bahwa arus sebesar 100A diperoleh nilai kekuatan tarik yang tertinggi dibandingkan dengan variasi arus pengelasan lainnya.



Gambar 2.11 Grafik nilai kekuatan tarik pengelasan *stainless steel* 316 dengan variasi arus pengelasan 80A, 90A, 100A, dan 110A. (Moslemi, et al. 2015)

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh D. M. E. Villanueva, F. C. P. Junior, R. L. Plaut, dan A. F. Padilha tentang “*Comparative Study on Sigma Phase Precipitation of Three Types of Stainless Steels: Austenitic, Superferritic, and Duplex*” menunjukkan hasil penelitian yaitu melalui pengujian *creep*, munculnya fasa sigma pada baja tahan karat seri 316L setelah diobservasi di daerah delta ferrite pada mikrostruktur sebelum dilakukan pengujian *creep*. Selain itu, fasa sigma juga muncul lebih lama pada *grain boundaries*, terutama pada bagian *triple points*. Pada bagian *grain interior* tidak ditemukan adanya fasa sigma. Presipitasi fasa sigma pada austenit secara umum terjadi dengan sangat lambat dan memakan waktu yang cukup lama. Hal tersebut dikarenakan beberapa hal:

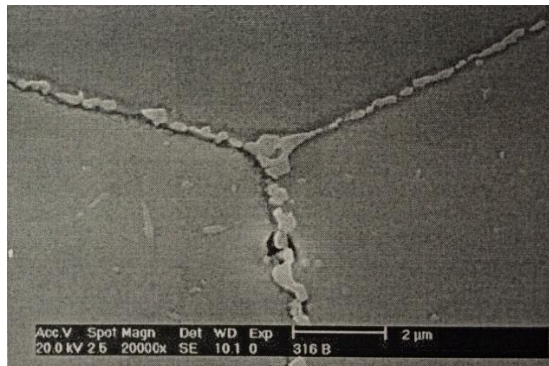
- Fasa sigma memiliki solubilitas karbon dan nitrogen yang rendah, maka dari itu presipitasi karbida dan nitrida harus terbentuk sebelum presipitasi sigma
- Difusi elemen pengganti sangat lambat pada daerah austenit



- c. Persebaran fasa sigma tidak merata di daerah austenit dan nukleasinya sangat sulit



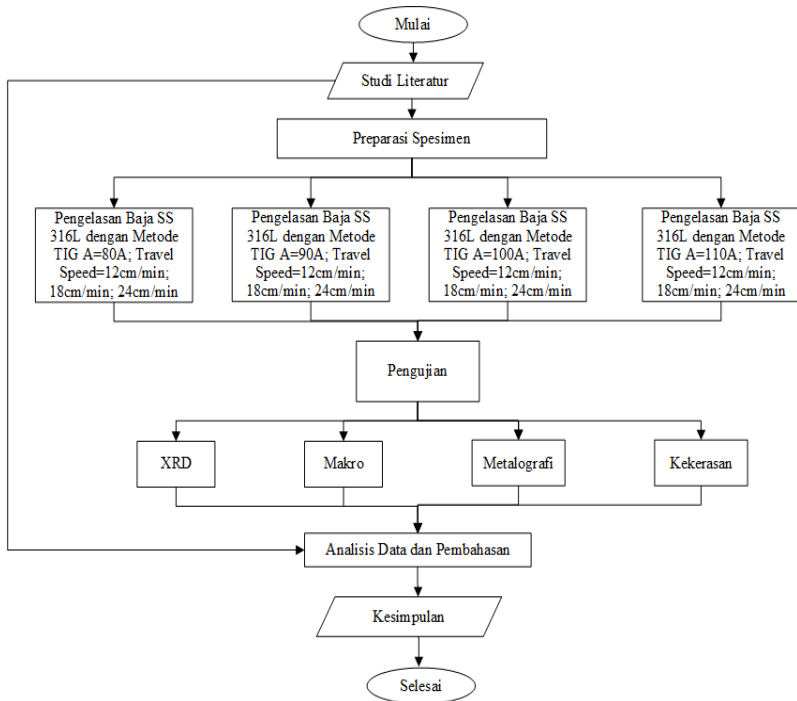
Gambar 2.12 Presipitasi fasa sigma di daerah ferrit pada *gauge length* dari sampel pengujian *creep* baja 316L yang diuji pada 550°C dengan beban 150 Mpa (Villanueva, et al. 2006)



Gambar 2.13 Presipitasi fasa sigma di grain boundaries pada *gauge length* dari sampel pengujian *creep* baja 316L yang diuji pada 550°C dengan beban 150 Mpa (Villanueva, et al. 2006)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah dengan studi literatur dan pengujian. Studi literatur mengacu pada *handbook*, buku penunjang, standar internasional, serta jurnal penelitian. Pengujian yang dilakukan adalah uji makro, uji metalografi, dan uji kekerasan.



3.3 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

1. Material Uji

Material yang digunakan dalam pengujian kali ini adalah baja tahan karat SS 316L berbentuk plat dengan ketebalan 5 mm sebanyak 12 buah.

2. Elektroda

Elektroda yang digunakan pada proses pengelasan dalam penelitian kali ini adalah ER 316L dengan diameter 2,4 mm.

3. Gas Argon

Gas argon yang digunakan dalam penelitian kali ini memiliki kemurnian 100%.

3.4 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

1. Penggaris

Digunakan untuk mengukur spesimen penelitian.

2. Kamera

Digunakan untuk mendokumentasikan setiap kegiatan selama penelitian berlangsung.

3. Alat Pemotong

Digunakan untuk memotong spesimen penelitian.

4. Mesin Las TIG

Digunakan untuk mengelas spesimen penelitian.

5. Mesin *Grinding* dan *Polishing*

Digunakan untuk preparasi spesimen metalografi.

6. Amplas Grade 80-2000

Digunakan untuk preparasi spesimen metalografi.

7. Gerinda

Digunakan untuk preparasi spesimen metalografi dan kekerasan.



8. Larutan Etsa *Glyceria*
Digunakan untuk melakukan etsa pada spesimen metalografi.
9. Mesin Uji Kekerasan
Digunakan untuk melakukan uji kekerasan.
10. Mikroskop Optik
Digunakan untuk melakukan uji metalografi.

3.5 Tahapan Penelitian

Tahap-tahap yang dilakukan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

3.5.1 Penentuan Parameter Pengelasan

Agar mendapatkan hasil pengelasan yang baik, maka dibutuhkan parameter pengelasan yang sesuai. Parameter pengelasan disesuaikan dengan variasi yang ingin diujikan pada spesimen sebagai tertera pada tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Parameter Pengelasan

Tegangan (Volts)	10
<i>Travel Speed</i> (cm/min)	12, 18, 24
Arus (Ampere)	80, 90, 100, 110
<i>Preheat</i> (C)	-
Tipe Polaritas	DCEN
<i>Filler Las</i>	ER 316L

3.5.2 Preparasi Spesimen

Preparasi baja tahan karat SS 316L diawali dengan memotong menjadi beberapa spesimen dengan ukuran yang disesuaikan dengan standar pengujian. Kemudian melakukan pemotongan spesimen tersebut menjadi 2 bagian. Selanjutnya yaitu membersihkan daerah pada spesimen yang di las dengan metode TIG.



3.5.3 Pengelasan TIG

Pada penelitian kali ini, proses pengelasan spesimen dengan menggunakan metode TIG dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan mesin las TIG.
2. Mempersiapkan spesimen.
3. Posisi pengelasan dengan menggunakan posisi pengelasan mendatar.
4. Meletakkan spesimen diatas *backing plate*.
5. Mempersiapkan elektroda dan gas argon.
6. Mengatur arus, kecepatan pengelasan, serta tegangan sesuai dengan parameter pengelasan yang telah ditentukan.
7. Setelah melakukan persiapan alat-alat pengelasan, maka dilakukan proses pengelasan.
8. Setelah proses pengelasan selesai, maka dilakukan pendinginan spesimen secara biasa.

3.5.4 Preparasi Spesimen Pengujian

Setelah proses pengelasan dilakukan, selanjutnya spesimen pengujian diberi tanda sesuai dengan variasi arus dan kecepatan pengelasan yang telah diberikan. Spesimen juga disesuaikan dengan dimensi yang tertera pada standar di setiap pengujian.

3.5.5 Proses Pengujian Spesimen

Proses pengujian yang dilakukan pada penelitian kali ini adalah pengujian makro, pengujian metalografi, dan pengujian kekerasan.

3.5.5.1 Pengujian Makro

Pengujian makro dilakukan untuk mengukur lebar *heat affected zone* (HAZ) pada spesimen dengan menggunakan kontak visual secara langsung dan diukur menggunakan penggaris sebagai pembanding.



3.5.5.2 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui fasa, bentuk, serta ukuran struktur mikro di daerah *base metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal* pada spesimen hasil pengelasan. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk memprediksikan transformasi yang terjadi selama proses pengelasan ataupun perlakuan panas. Pengujian metalografi ini menggunakan standar ASM Volume 09 dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Tahap Persiapan
 1. *Cutting*
Pemotongan spesimen dilakukan dengan menggunakan gergaji mesin/manual.
 2. *Mounting*
Membuat pegangan untuk mempermudah pemegangan spesimen saat proses grinding.
 3. *Grinding*
Menggosok spesimen dengan menggunakan amplas silikon karbida mulai dari grade 80 hingga 2000.
 4. *Polishing*
Memoles spesimen dengan pasta alumina dengan tujuan untuk memastikan tidak ada goresan pada bagian permukaan.
 5. *Etching*
Mencelupkan permukaan spesimen kedalam larutan etsa *Glycergia* yang digunakan pada pengujian kali ini.
- b. Tahap Pengamatan
 1. Pengamatan Spesimen
Langkah ini bertujuan untuk mengamati struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan dilakukan dengan beberapa kali perbesaran. Pengujian ini dilaksanakan di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material



FTI-ITS dengan menggunakan mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*.



Gambar 3.2 Mikroskop optik

3.5.5.3 Pengujian Kekerasan

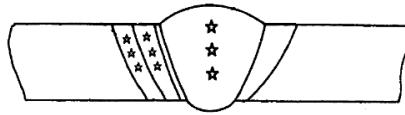
Pengujian kekerasan (*Hardness test*) dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan di daerah *base metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal*. Standar pengujian kekerasan yang digunakan adalah dengan menggunakan metode vickers berdasarkan ASTM E92. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *Wolpert Wilson Digital Hardness Tester 3000BLD* yang terdapat di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material FTI-ITS.



Gambar 3.3 Alat uji kekerasan

Berikut merupakan prosedur untuk pengujian kekerasan:

1. Mempersiapkan spesimen sesuai dengan standar pengujian.
2. Mempersiapkan peralatan pengujian *hardness*, untuk pengujian diberikan 3 titik pengujian pada *base metal*, 3 titik pada *HAZ*, dan 3 titik pada *weld metal*.
3. Pengujian dilakukan pada posisi top, center dan bottom.
4. Meletakkan material uji pada meja kerja, menekan *indenter* pada masing – masing lokasi yang diinginkan pada masing – masing spesimen dengan beban yang ditentukan sesuai standar.
5. *Indenter* diletakkan pada tempat yang diuji kekerasannya dengan cara menekan tombol yang terdapat pada mesin *hardness*. Setelah itu, *indenter* menekan spesimen dengan *dwell time* kurang lebih selama 15 detik.
6. Mencatat hasil pengukuran.

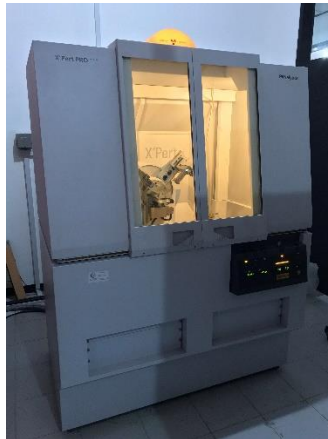


Gambar 3.4 Posisi titik uji kekerasan pada daerah pengelasan

3.5.5.4 Pengujian XRD

Pengujian *X-ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui bentuk fasa yang terjadi pada spesimen setelah dilakukan variasi perlakuan saat proses pengelasan. Pengujian ini dilakukan di Departemen Teknik Material FTI-ITS. Langkah-langkah pengujian XRD adalah sebagai berikut:

1. Pemotongan spesimen uji menggunakan gerinda dengan ketebalan 5 mm.
2. Permukaan yang akan diamati akan diratakan terlebih dahulu menggunakan alat amplas.
3. Dilakukan pengujian.



Gambar 3.5 Alat uji XRD



3.6 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan penelitian kali ini tertera pada tabel 3.2 berikut:

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian

Materi al	Arus (A)	<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Makro	Metalo grafi	Keker asan	XRD
SS 316L	80	12	✓	✓	✓	✓
		18	✓	✓	✓	✓
		24	✓	✓	✓	✓
	90	12	✓	✓	✓	✓
		18	✓	✓	✓	✓
		24	✓	✓	✓	✓
	100	12	✓	✓	✓	✓
		18	✓	✓	✓	✓
		24	✓	✓	✓	✓
	110	12	✓	✓	✓	✓
		18	✓	✓	✓	✓
		24	✓	✓	✓	✓



3.7 Jadwal Penelitian

Penelitian ini berlangsung selama kurang lebih 4 (empat) bulan dengan rincian kegiatan setiap tahap seperti tertera pada tabel 3.3 berikut:

Tabel 3.3 Jadwal Penelitian

Waktu Kegiatan	Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur	■	■	■													
Konsultasi Kepada Pembimbing	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Penyusunan Laporan	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Preparasi Spesimen				■	■											
Proses Pengelasan TIG						■	■									
Pengujian Makro								■	■							
Pengujian Metalografi										■	■					
Pengujian Kekerasan												■	■			
Pengujian XRD														■	■	

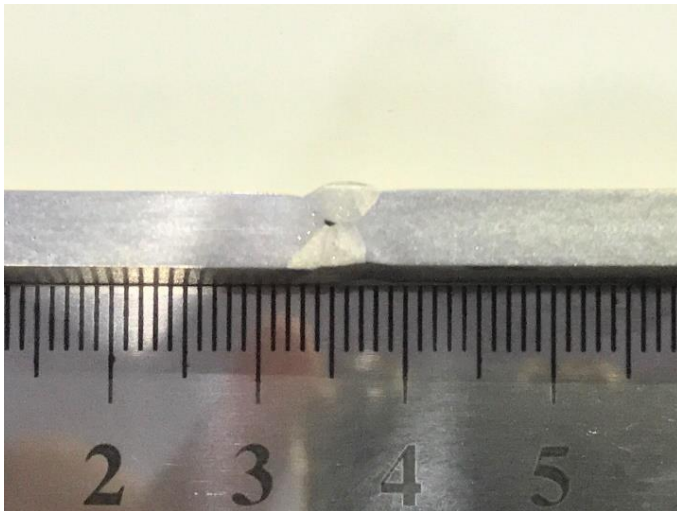
BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

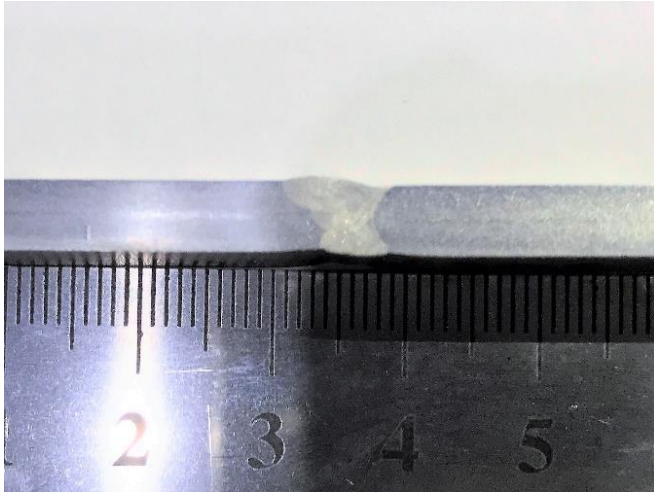
4.1 Analisis Data

4.1.1 Hasil Pengamatan Makro

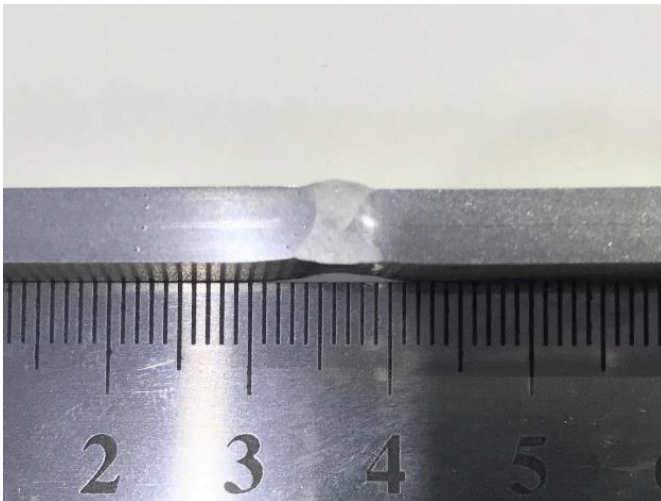
Berdasarkan hasil pengamatan makro, didapatkan perbedaan daerah las pada setiap spesimen yaitu *base metal*, *HAZ*, dan *weld metal*. Ukuran dan lebar *HAZ* yang terbentuk dipengaruhi oleh besarnya *heat input* yang divariasikan pada penelitian kali ini, yaitu pada kecepatan pengelasan dan arus. Hasil pengamatan secara makro didokumentasikan dalam bentuk foto pada gambar 4.1-4.12.



Gambar 4.1 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 80 A

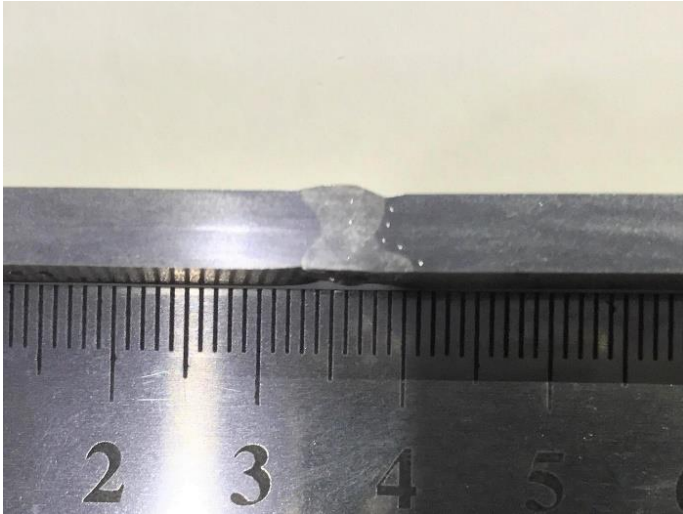


Gambar 4.2 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 90 A

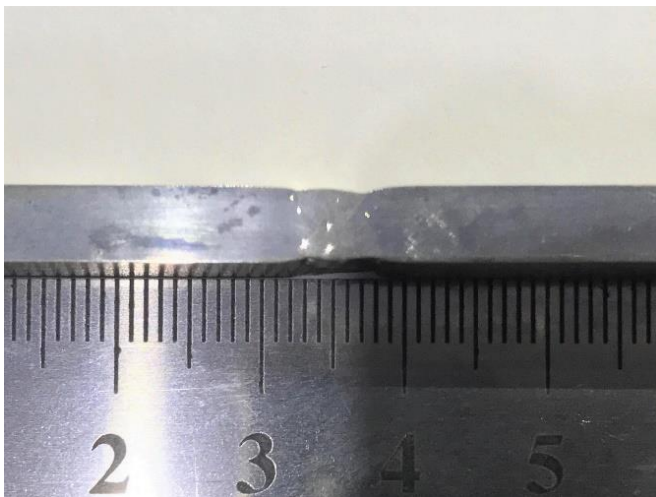


Gambar 4.3 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 100 A

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

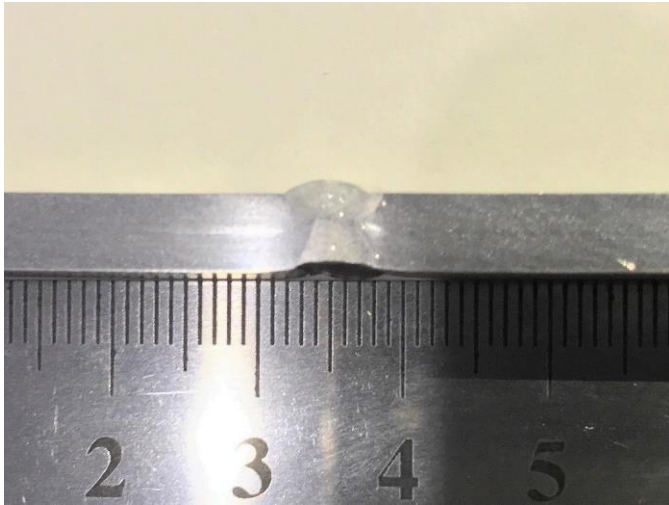


Gambar 4.4 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 110 A

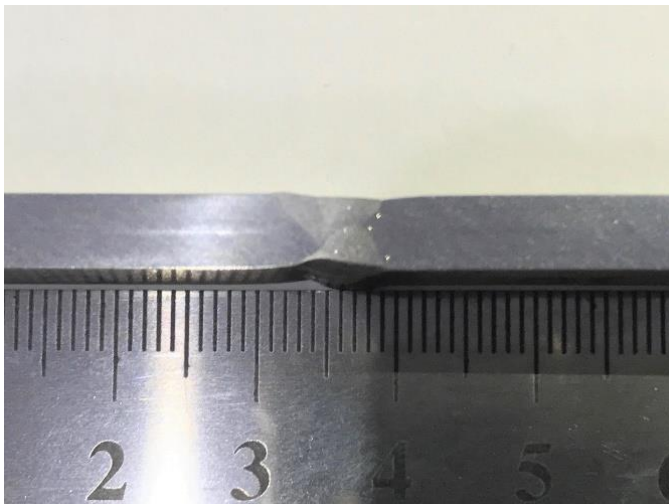


Gambar 4.5 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 80 A

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

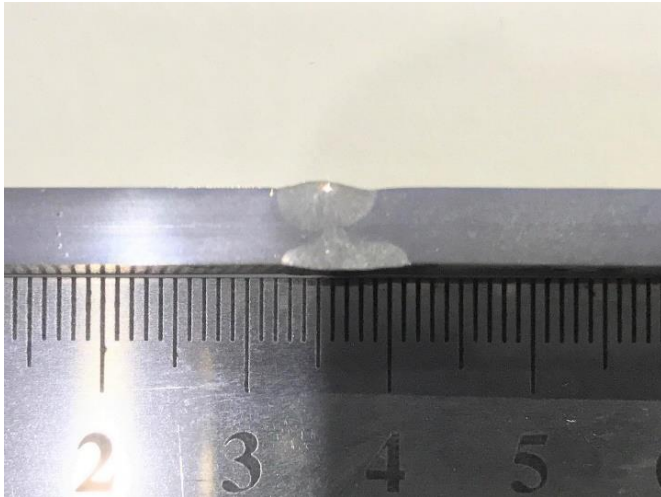


Gambar 4.6 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 90 A

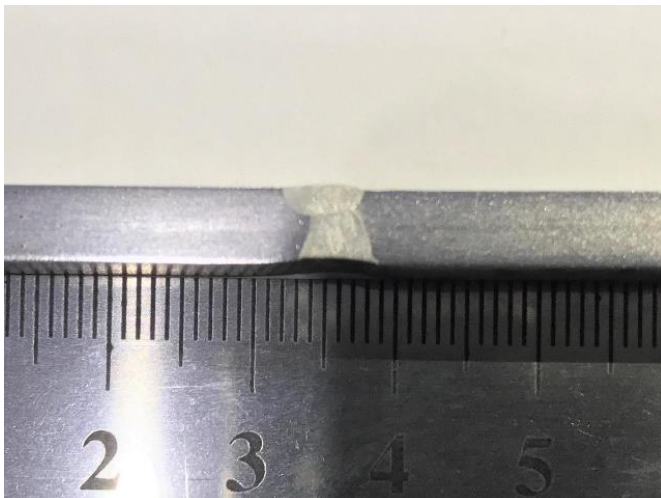


Gambar 4.7 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 100 A

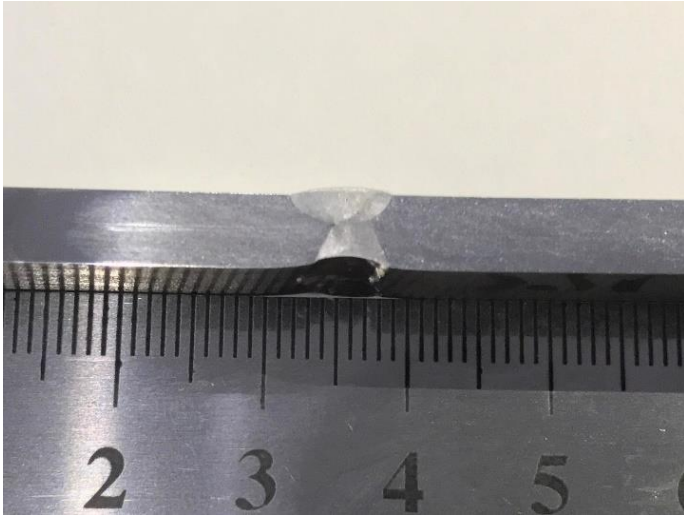
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



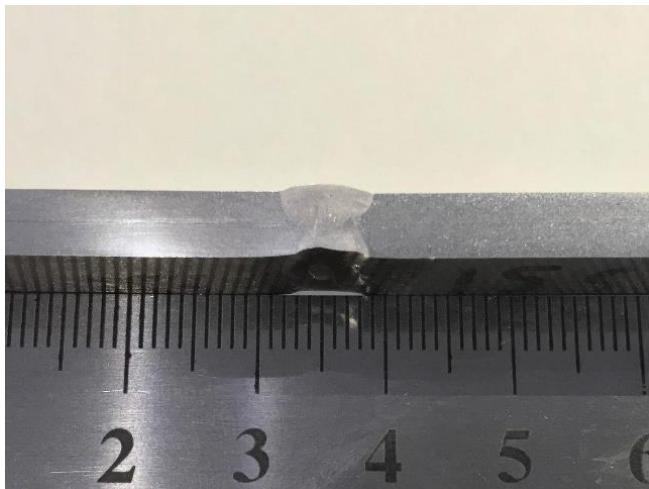
Gambar 4.8 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 110 A



Gambar 4.9 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 80 A

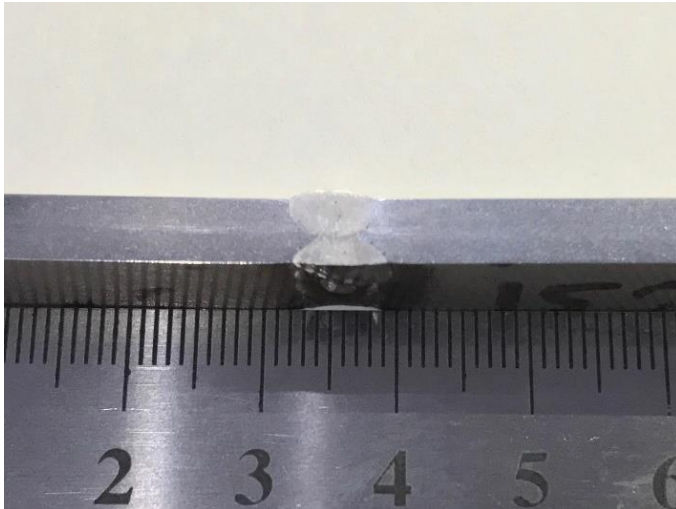


Gambar 4.10 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 90 A



Gambar 4.11 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 100 A

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN


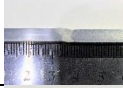






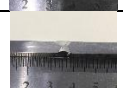





Gambar 4.12 Hasil foto makro spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 110 A

Hasil pengelasan yang diamati secara makro ini dilakukan setelah mengetsa spesimen dengan menggunakan etsa *glycergia*. Pada pengamatan makro hanya terlihat batas antara daerah *weld metal* dan *base metal*, sehingga untuk mengetahui lebar HAZ yang terbentuk dibutuhkan perhitungan dari data-data yang diperoleh. Berikut adalah perbandingan dan deskripsi yang didapatkan pada pengamatan makro yang ditampilkan pada tabel 4.1.



Tabel 4.1 Tabulasi Hasil Pengamatan Makro

No	Parameter		Gambar	Deskripsi
	Travel Speed (cm/min)	Arus (A)		
1	12	80		<i>Incomplete fusion</i>
2		90		Tidak simetris
3		100		Simetris
4		110		Tidak simetris
5	18	80		Tidak simetris
6		90		Tidak simetris
7		100		Tidak simetris
8		110		Tidak simetris
9	24	80		Tidak simetris
10		90		Tidak simetris
11		100		Tidak simetris
12		110		Simetris

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



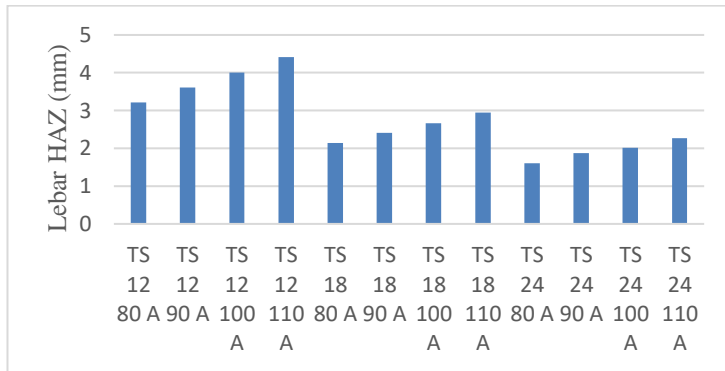
4.1.2 Hasil Perhitungan Lebar HAZ

Berdasarkan pemberian variasi arus dan kecepatan pengelasan yang dilakukan pada saat pengelasan, didapatkan lebar *heat affected zone* (HAZ) seperti ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Lebar HAZ

No	Parameter		<i>Heat Input</i> (kJ/mm)	Lebar HAZ (mm)
	<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Arus (A)		
1	12	80	0,24	3,21
2		90	0,27	3,61
3		100	0,30	4,01
4		110	0,33	4,41
5	18	80	0,16	2,14
6		90	0,18	2,41
7		100	0,20	2,67
8		110	0,22	2,94
9	24	80	0,12	1,60
10		90	0,14	1,87
11		100	0,15	2,01
12		110	0,17	2,27

Data lebar HAZ pada tabel diatas dibuat menjadi grafik perbandingan seperti ditampilkan pada gambar 4.13 berikut.



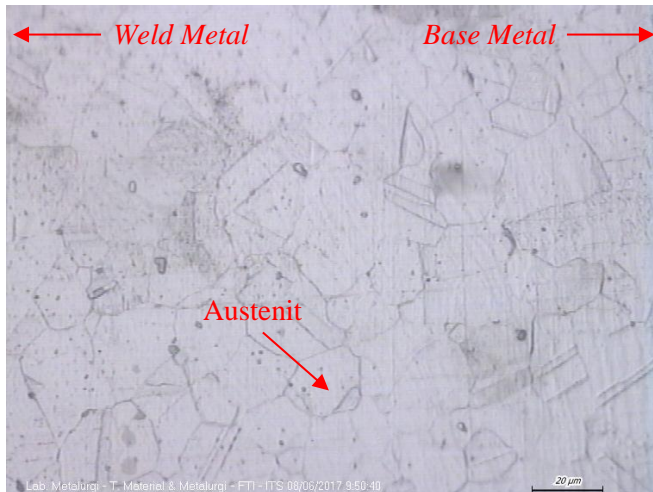
Gambar 4.13 Grafik perbandingan lebar *heat affected zone* (HAZ)

4.1.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

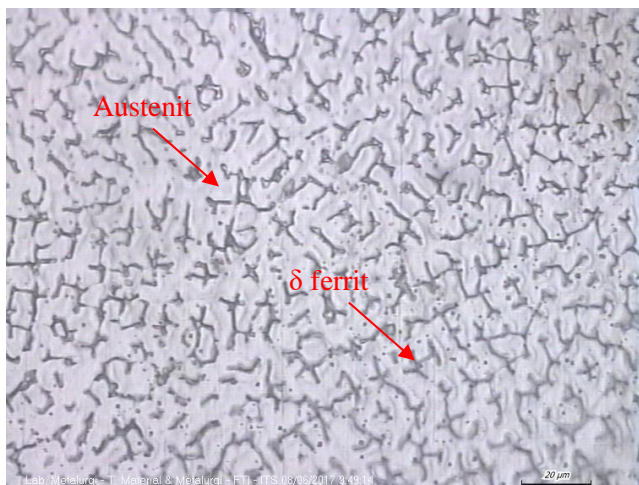
Pengamatan ini dilakukan menggunakan mikroskop optik pada ketiga daerah las, yaitu *base metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal* yang ditunjukkan pada gambar 4.14-4.49.



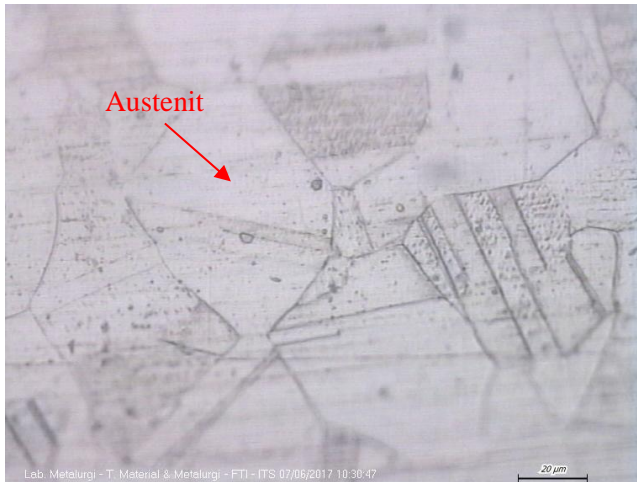
Gambar 4.14 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X



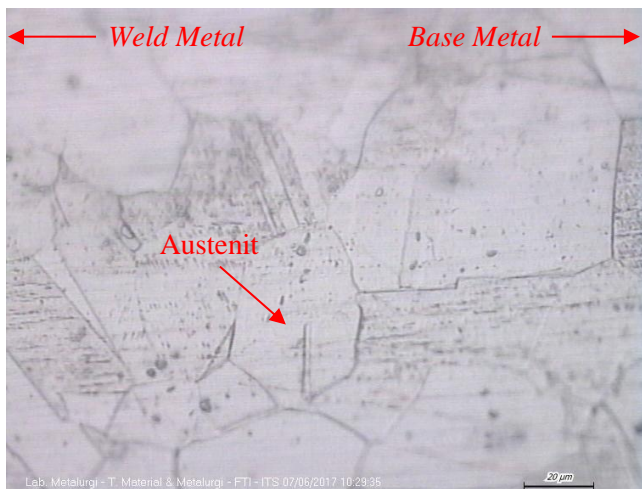
Gambar 4.15 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X



Gambar 4.16 Hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X

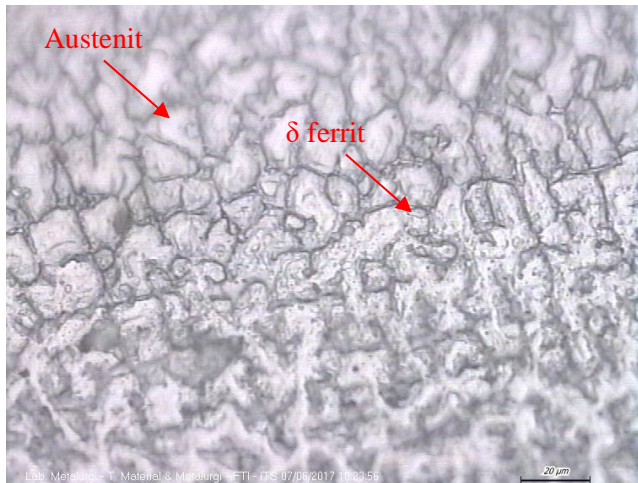


Gambar 4.17 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X

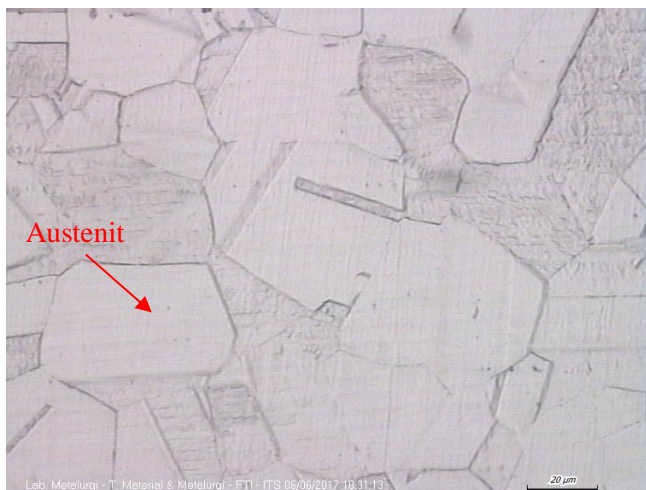


Gambar 4.18 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X

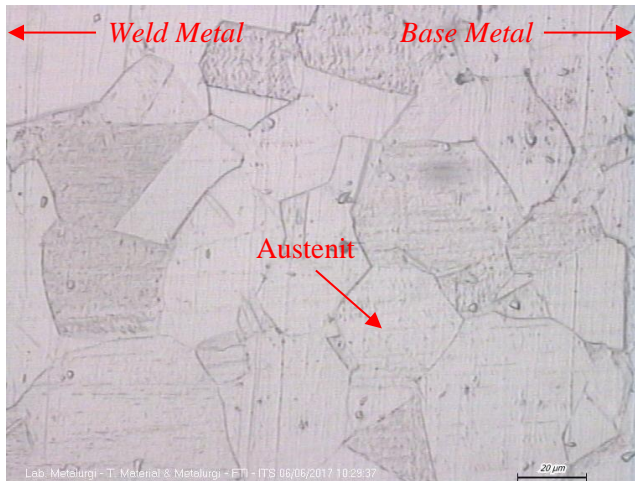
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



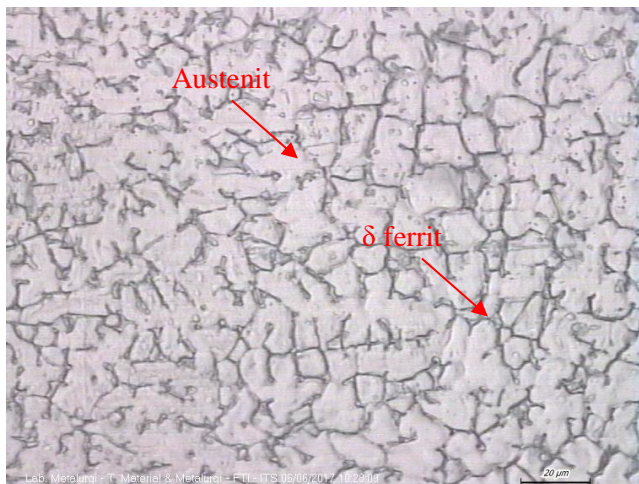
Gambar 4.19 Hasil struktur mikro pada *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X



Gambar 4.20 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X

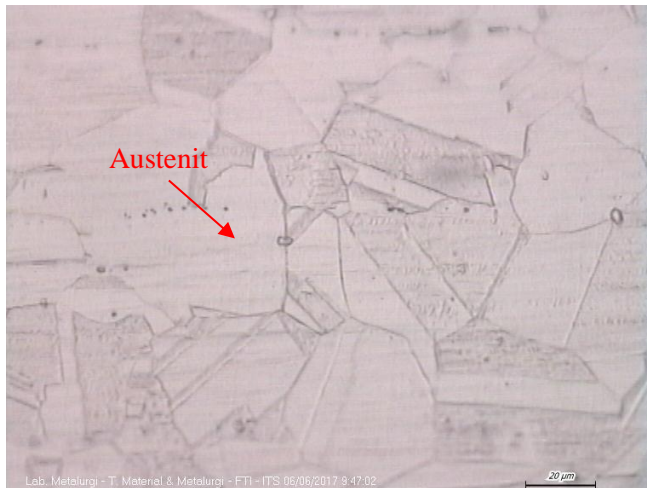


Gambar 4.21 Hasil struktur mikro pada daerah HAZ spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X

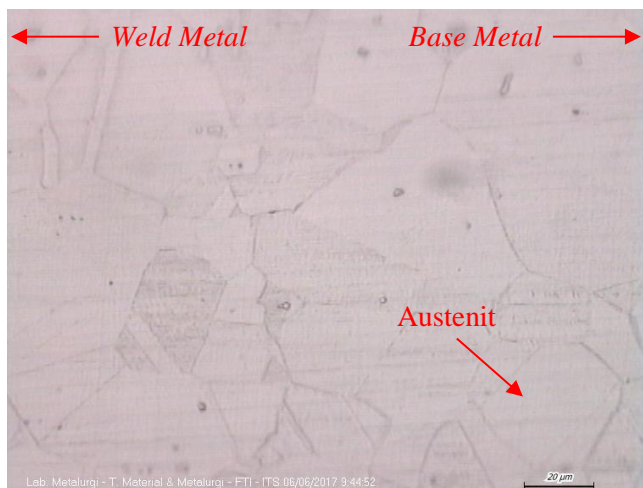


Gambar 4.22 Hasil struktur mikro pada daerah weld metal spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X

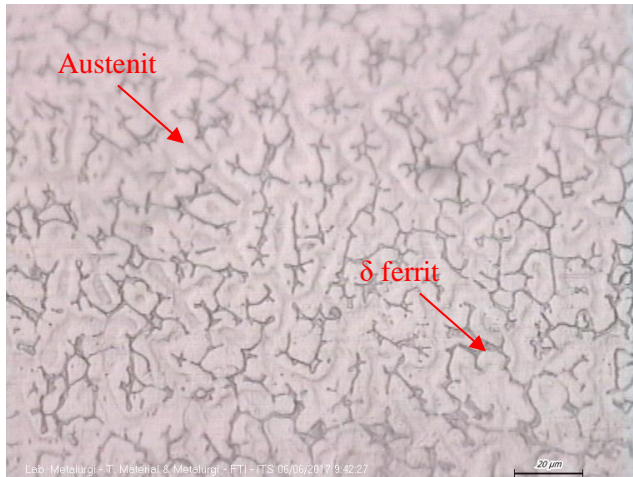
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.23 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X



Gambar 4.24 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X

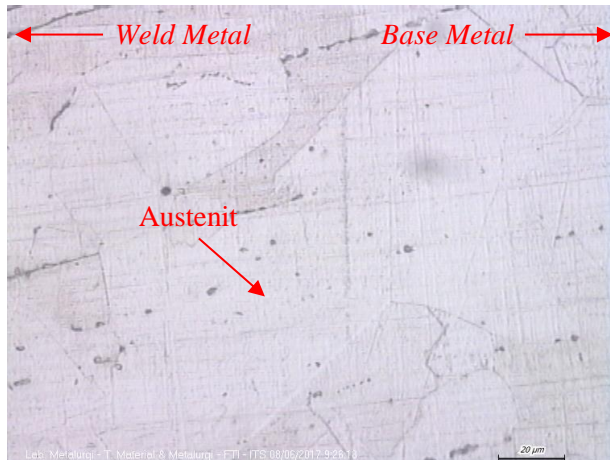


Gambar 4.25 Hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X

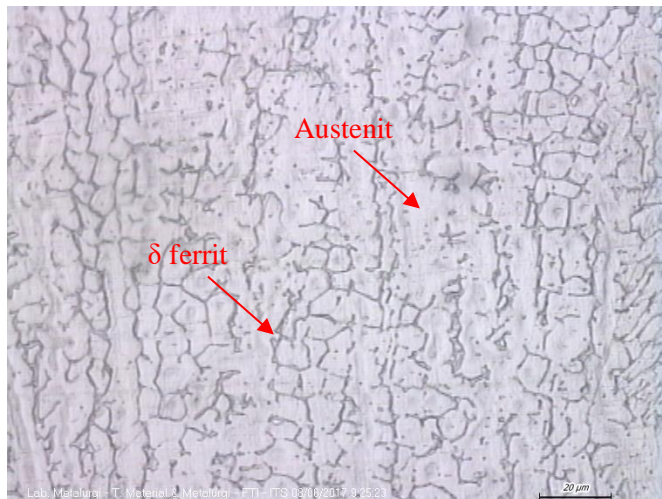


Gambar 4.26 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



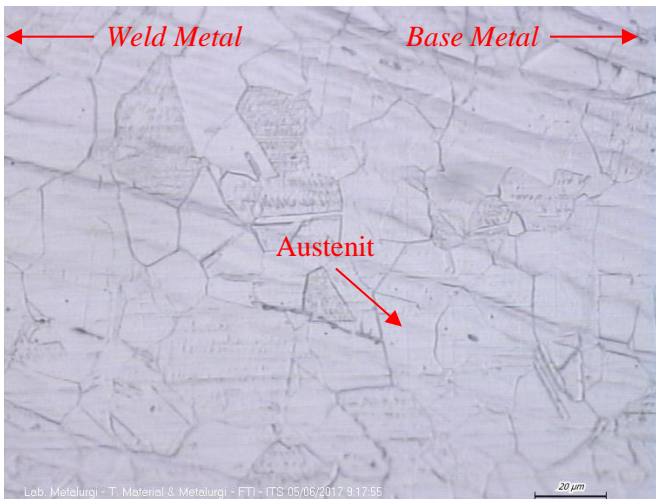
Gambar 4.27 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X



Gambar 4.28 Hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X

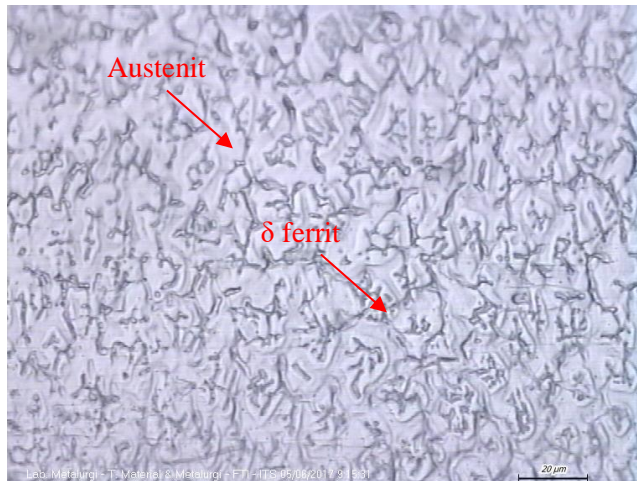


Gambar 4.29 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X



Gambar 4.30 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X

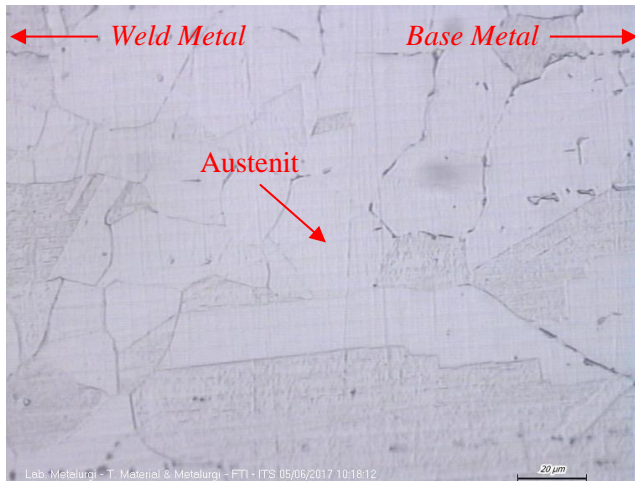
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



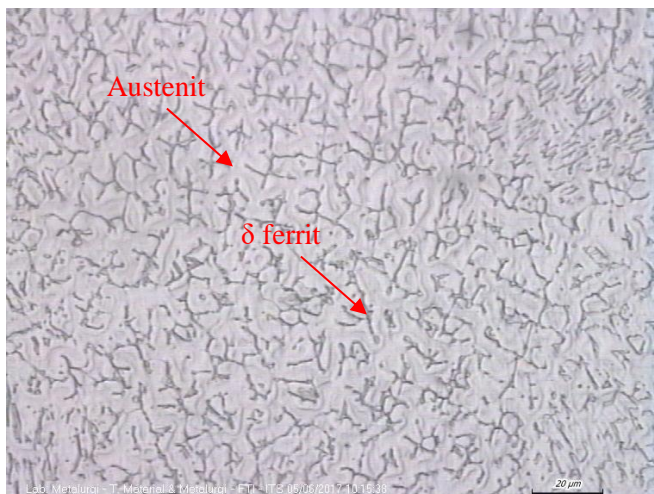
Gambar 4.31 Hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X



Gambar 4.32 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X

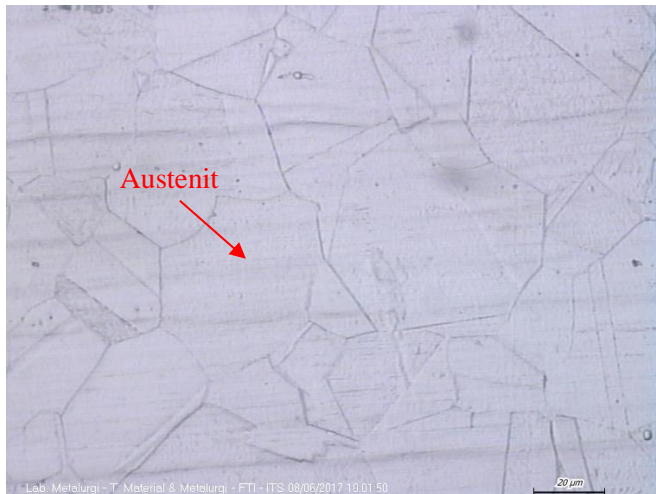


Gambar 4.33 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X

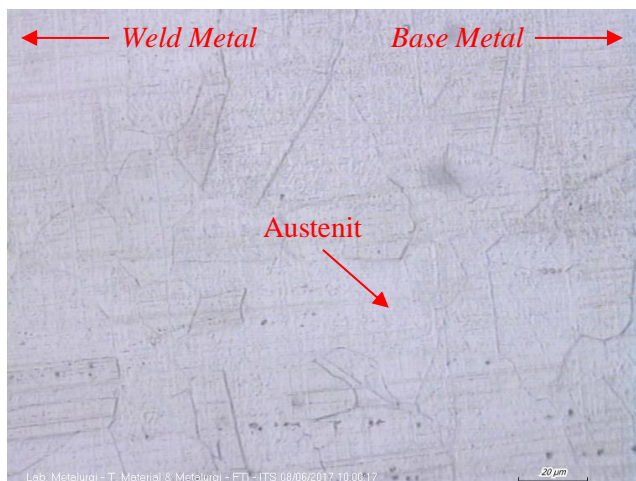


Gambar 4.34 Hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X

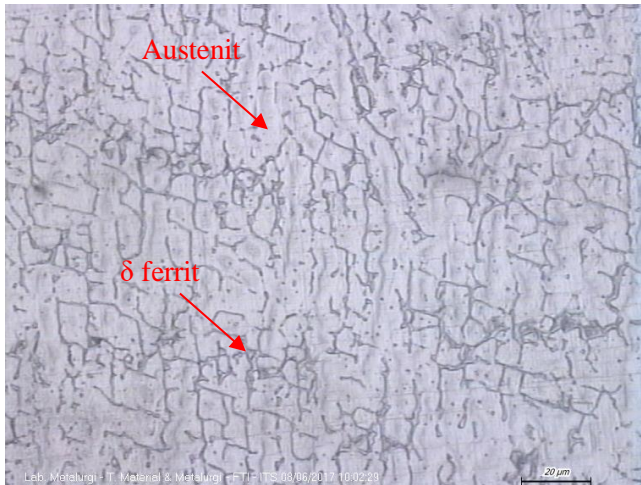
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



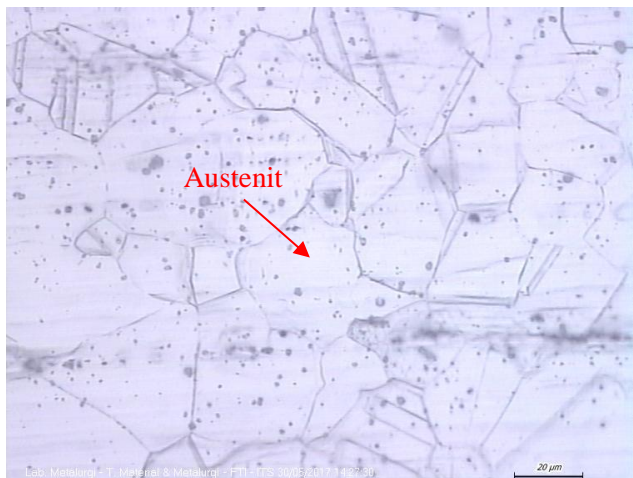
Gambar 4.35 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X



Gambar 4.36 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X

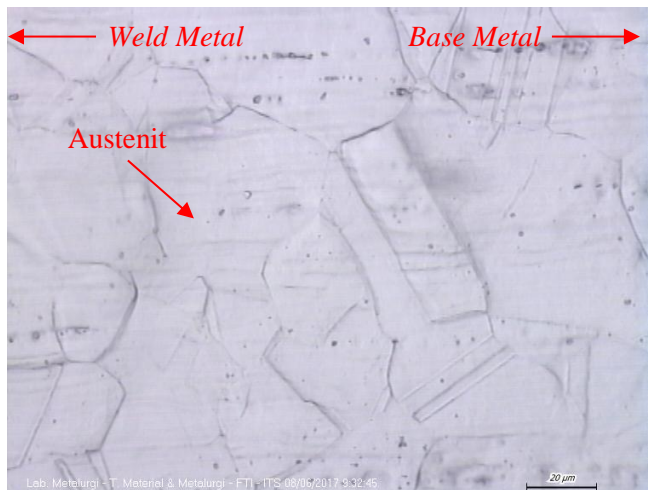


Gambar 4.37 Hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X

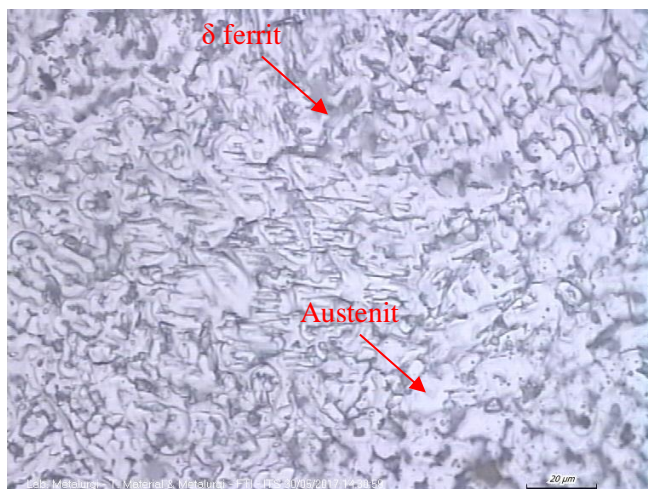


Gambar 4.38 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X

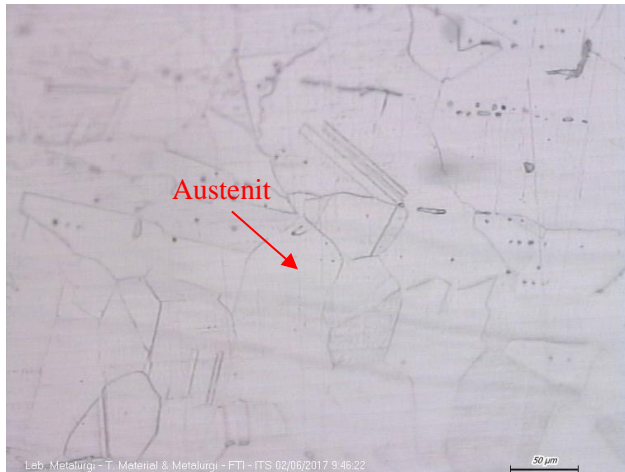
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



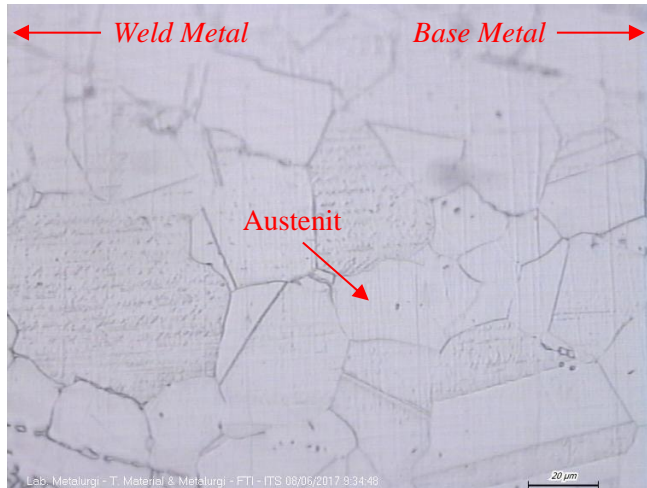
Gambar 4.39 Hasil struktur mikro pada daerah HAZ spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X



Gambar 4.40 Hasil struktur mikro pada daerah weld metal spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 80 A perbesaran 500X

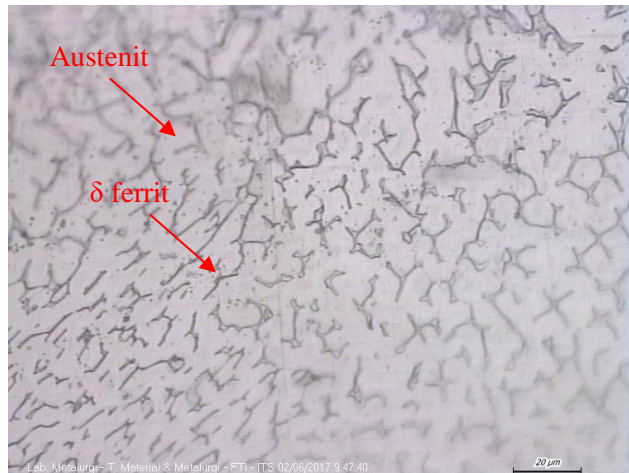


Gambar 4.41 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X

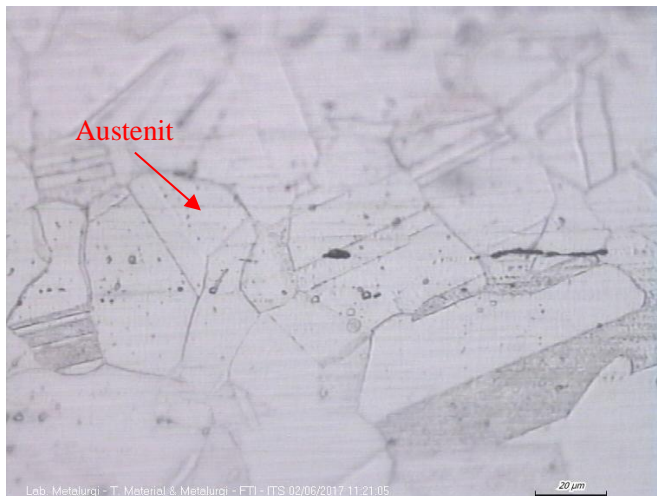


Gambar 4.42 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X

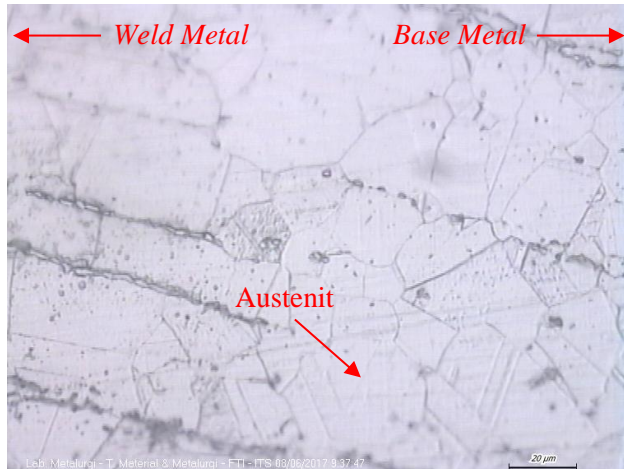
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



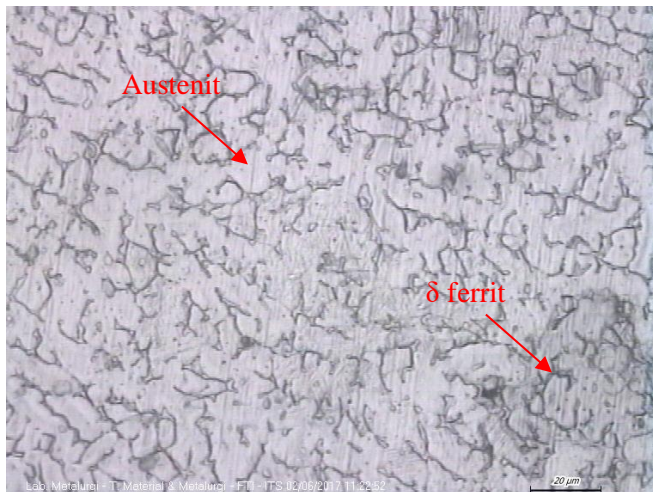
Gambar 4.43 Hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 90 A perbesaran 500X



Gambar 4.44 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X



Gambar 4.45 Hasil struktur mikro pada daerah HAZ spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X

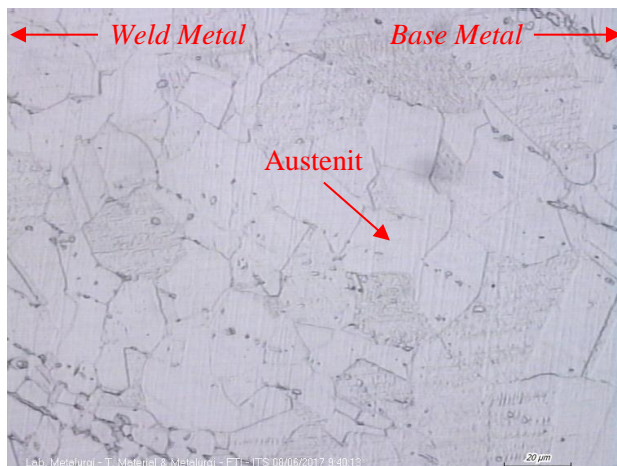


Gambar 4.46 Hasil struktur mikro pada daerah weld metal spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 100 A perbesaran 500X

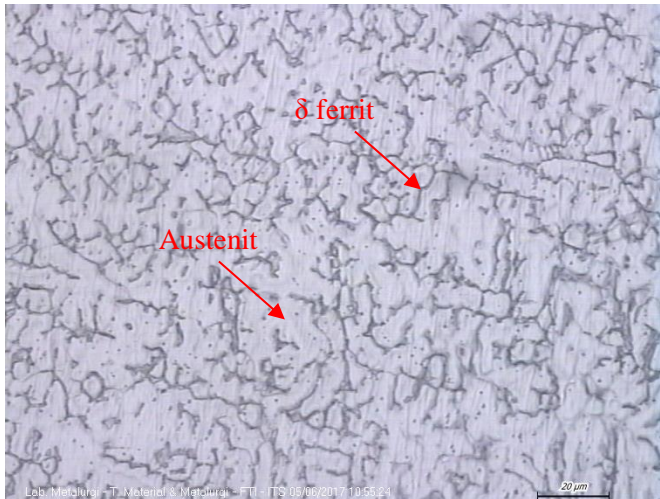
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.47 Hasil struktur mikro pada daerah *base metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X



Gambar 4.48 Hasil struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X



Gambar 4.49 Hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* spesimen pengelasan SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min dan arus 110 A perbesaran 500X

Fasa δ ferrit hanya terdapat pada daerah *weld metal*. Perbandingan presentase ferrit yang didapatkan menggunakan aplikasi imageJ ditampilkan pada tabel 4.3.



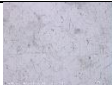
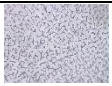












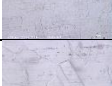







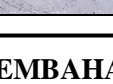
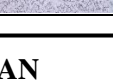
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Kadar δ Ferrit pada Daerah
Weld Metal Menggunakan Aplikasi ImageJ

Parameter		Kadar Ferit (%)
<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Arus (A)	
12	80	17,64
	90	17,33
	100	16,98
	110	16,54
18	80	17,24
	90	17,14
	100	16,12
	110	15,83
24	80	16,61
	90	16,15
	100	15,75
	110	15,60

Perbandingan dari keseluruhan struktur mikro pada daerah *heat affected zone* (HAZ) dan *weld metal* ditampilkan pada tabel 4.4.



Tabel 4.4 Tabulasi Hasil Struktur Mikro *HAZ* dan *Weld Metal*

No	Parameter		<i>Heat Affected Zone (HAZ)</i>	<i>Weld Metal</i>
	<i>Travel Speed (cm/min)</i>	<i>Arus (A)</i>		
1	12	80		
2		90		
3		100		
4		110		
5	18	80		
6		90		
7		100		
8		110		
9	24	80		
10		90		
11		100		
12		110		

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



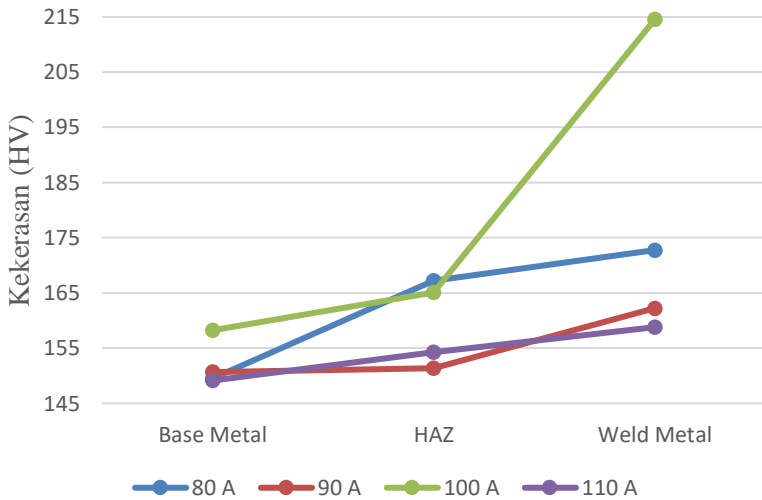
4.1.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode *vickers*. Pengambilan data dilakukan pada 3 titik indentasi di masing-masing 3 daerah las yang berbeda, yaitu *base metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal* untuk mengetahui distribusi kekerasan pada masing-masing spesimen. Berikut adalah nilai rata-rata distribusi kekerasan di tiap daerah indentasi yang tertera pada tabel 4.5.

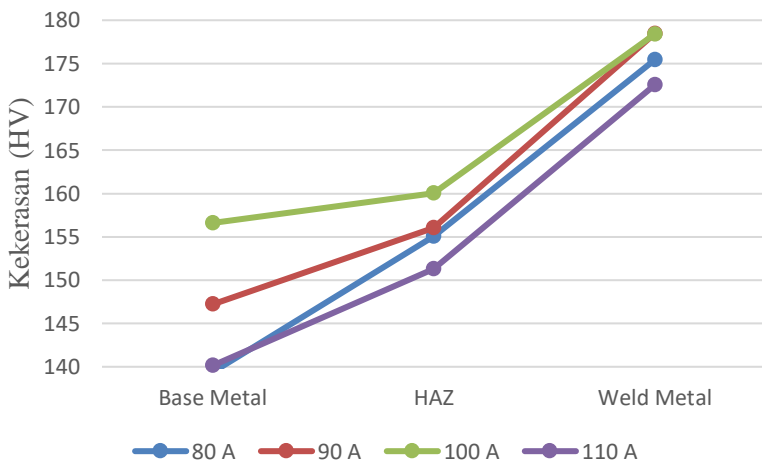
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kekerasan SS 316L

Parameter		Kekerasan Rata-rata (HV)		
<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Arus (A)	<i>Base Metal</i>	<i>Heat Affected Zone</i> (HAZ)	<i>Weld Metal</i>
12	80	149,5	167,2	172,7
	90	150,7	151,3	162,2
	100	158,2	165,1	214,5
	110	149,1	154,2	158,8
18	80	139,4	155,1	175,4
	90	147,2	156,0	178,4
	100	156,6	160,0	178,4
	110	140,1	151,3	172,5
24	80	148,4	154,6	182,7
	90	143,0	150,0	167,3
	100	141,6	144,1	166,9
	110	142,6	155,9	175,8

Dari data tersebut kemudian diplot menjadi grafik pada gambar 4.50-4.52

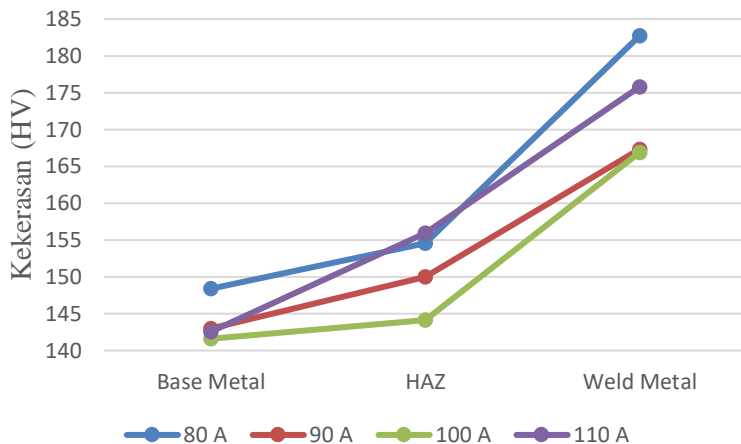


Gambar 4.50 Grafik perbandingan nilai kekerasan pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min



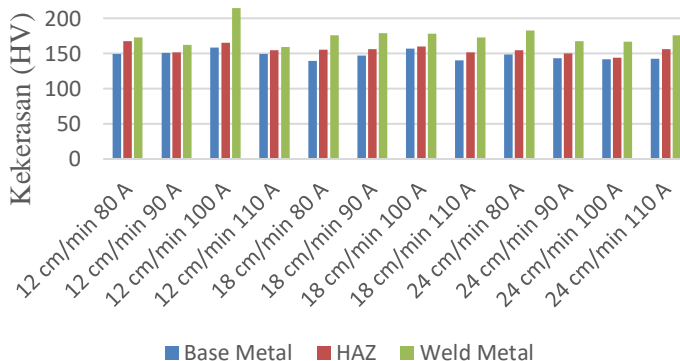
Gambar 4.51 Grafik perbandingan nilai kekerasan pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.52 Grafik perbandingan nilai kekerasan pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min

Berikut adalah perbandingan nilai kekerasan di setiap daerah las dari seluruh spesimen yang ditampilkan pada gambar 4.53.

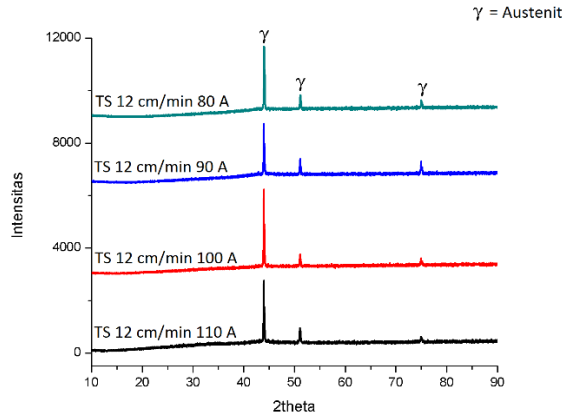


Gambar 4.53 Grafik perbandingan keseluruhan nilai kekerasan pada setiap daerah las SS 316L

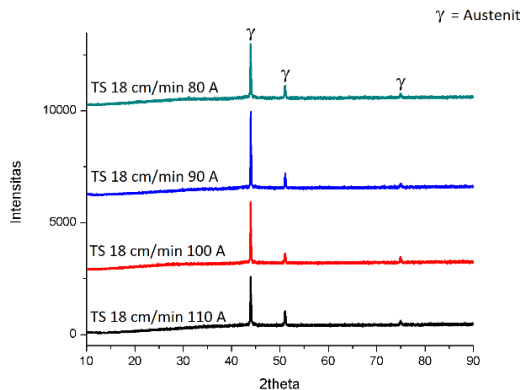


4.1.5 Hasil Pengujian XRD

Pengujian XRD (*X-ray Diffraction*) dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada spesimen. Berikut adalah grafik hasil pengujian XRD yang ditampilkan pada gambar 4.54-4.56.

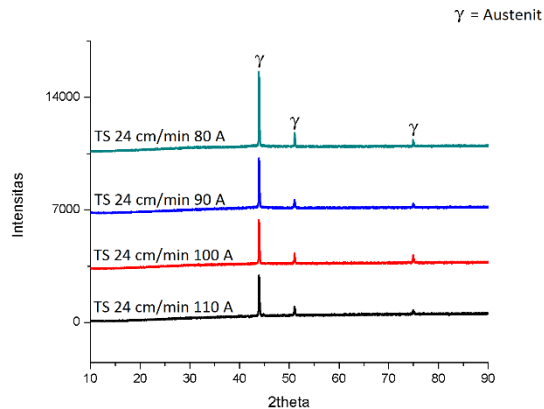


Gambar 4.54 Grafik hasil pengujian XRD pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min

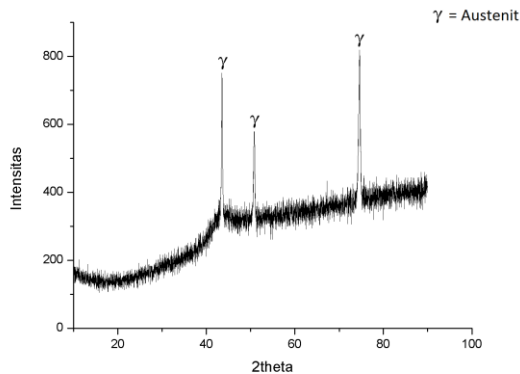


Gambar 4.55 Grafik hasil pengujian XRD pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 18 cm/min

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.56 Grafik hasil pengujian XRD pada SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 24 cm/min



Gambar 4.57 Grafik hasil pengujian XRD pada daerah *weld metal* SS 316L dengan parameter kecepatan pengelasan 12 cm/min dengan 100 A

Pada grafik dari masing-masing sampel pengujian terdapat 3 *peak* tertinggi yang menunjukkan fasa dominan yang terdapat



pada spesimen. Tabulasi 3 *peak* dengan intensitas tertinggi dari masing-masing sampel ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Tabulasi 3 *Peak* Tertinggi Hasil Pengujian XRD

Parameter		Peak 1		Peak 2		Peak 3	
<i>Travel Speed</i> (cm/mm in)	Arus (A)	Intensitas	Posisi (2theta)	Intensitas	Posisi (2theta)	Intensitas	Posisi (2theta)
12	80	2331,86	44,0017	508,74	51,1365	257,70	74,9836
	90	1907,90	43,9577	552,68	51,1073	436,16	74,9701
	100	2888,54	43,9572	419,68	51,0908	170,52	74,9494
	110	2287,90	43,9490	525,98	51,0786	173,43	74,9308
18	80	2344,99	43,9261	515,72	51,0576	182,99	74,8972
	90	3333,16	43,9516	643,02	51,0794	139,07	74,9289
	100	2661,87	43,9263	384,28	51,0603	233,34	74,9160
	110	2118,33	43,9385	601,59	51,0351	162,71	74,9120
24	80	4435,12	43,9273	879,01	51,0911	334,05	74,9253
	90	2950,74	43,9259	491,62	51,0548	181,69	74,9141
	100	2611,66	43,9254	593,96	51,0668	424,37	74,9139
	110	2449,32	43,9290	474,53	51,0576	257,64	74,9262

4.2 Pembahasan

Pada hasil pengamatan makro yang ditampilkan pada gambar 4.1-4.12, ditemukan adanya perbedaan daerah pada hasil las yaitu *base metal* dan *weld metal*. *Heat affected zone* (HAZ) tidak dapat dilihat secara makro sehingga untuk mengukur lebarnya membutuhkan perhitungan berdasarkan *heat input* yang diberikan. Pada hasil perhitungan lebar HAZ menunjukkan bahwa semakin tinggi *heat input* yang diberikan, maka lebar HAZ semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Navid Moslemi (2014) tentang pengelasan *austenitic stainless steel* yang menyatakan bahwa pengaruh *heat input* yang semakin tinggi akan meningkatkan lebar HAZ. Pemberian variasi arus dan kecepatan pengelasan yang berbeda

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



membuat bentuk hasil las yang berbeda-beda pula. Pemberian *heat input* yang tinggi mengakibatkan daerah yang terkena panas lebih besar sehingga bentuk las cenderung lebih dalam dan melebar. Selain itu, faktor lain yang mempengaruhi bentuk las yaitu komposisi logam las, komposisi *filler* las, serta gas pelindung yang digunakan pada saat proses pengelasan berlangsung.

Pada hasil pengujian metalografi yang ditampilkan pada gambar 4.14-4.49, ditemukan perbedaan bentuk struktur mikro pada setiap daerah las setelah diamati menggunakan mikroskop optik. Pada *base metal*, struktur mikro yang terlihat adalah austenit yang memiliki ukuran yang rata-rata besar serta bentuk yang kasar dan tidak terlalu jauh berbeda antara satu fasa austenit yang terlihat dengan fasa austenit yang lainnya. Fasa pada daerah *base metal* tidak mengalami banyak perubahan bentuk karena tidak menerima masukan panas yang besar pada saat proses pengelasan. Pada daerah HAZ, struktur mikro yang terlihat adalah austenit namun memiliki ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan austenit yang berada pada daerah base metal. Hal tersebut dapat terjadi karena HAZ merupakan daerah logam dasar yang terkena panas paling dekat dengan sumber panas pada saat pengelasan sehingga fasa austenit yang terbentuk terlihat halus dan berukuran kecil. Pada daerah *weld metal*, terjadi proses pembekuan yang memunculkan struktur butir kasar berbentuk *columnar grain* diiringi dengan timbulnya segregasi sebagai akibat adanya laju pendinginan yang cepat. Struktur mikro yang terbentuk pada sebagian besar *weld metal* adalah ferrit *vermicular* atau *skeletal* dan *lathy* atau kombinasi keduanya (Fajri, 2013). Selain itu, berdasarkan hasil perhitungan jumlah ferrit pada daerah *weld metal* dengan menggunakan aplikasi imageJ didapatkan bahwa semakin tinggi *heat input* yang diberikan maka kadar delta ferrit semakin menurun. Hal tersebut diakibatkan oleh turunnya laju pendinginan. Laju pendinginan yang lebih cepat mengakibatkan jumlah ferrit yang terbentuk semakin banyak.

Pada hasil pengujian kekerasan yang ditampilkan pada tabel 4.5, dapat diketahui bahwa spesimen dengan nilai kekerasan



yang paling tinggi pada daerah *base metal* yaitu sebesar 158,2 HV adalah SS316L dengan variasi *travel speed* 12 cm/min dengan arus 100 A. Selanjutnya spesimen dengan nilai kekerasan yang paling tinggi pada daerah *heat affected zone* (HAZ) yaitu sebesar 167,2 HV adalah SS316L dengan variasi *travel speed* 12 cm/min dengan arus 80 A. Kemudian spesimen dengan nilai kekerasan yang paling tinggi pada daerah *weld metal* yaitu sebesar 214,5 HV adalah SS316L dengan variasi *travel speed* 12 cm/min dengan arus 100 A. Hasil pengujian kekerasan juga menunjukkan bahwa urutan kekerasan pada daerah las dari yang paling tinggi hingga paling rendah adalah *weld metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *base metal*. Daerah *weld metal* menjadi daerah yang memiliki nilai kekerasan paling tinggi akibat proses pengelasan yang memberikan panas sehingga meleburkan *filler* las yang dilanjutkan dengan proses pendinginan secara cepat (Fadhil, 2016). Selain itu, tingginya nilai kekerasan pada daerah *weld metal* juga disebabkan oleh pengaruh komposisi kimia yang dimiliki oleh *filler* las. Daerah *heat affected zone* (HAZ) memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dari *base metal* namun tidak signifikan. Hal ini terjadi akibat ukuran butir austenit yang lebih kecil dan banyak pada daerah HAZ. Selain itu, perbedaan nilai kekerasan yang lebih tinggi juga disebabkan oleh pengambilan titik indentasi yang dilakukan pada daerah HAZ terletak dekat dengan daerah *weld metal*. Daerah *base metal* menjadi daerah yang memiliki nilai kekerasan paling rendah karena hanya terkena sedikit pengaruh panas yang terjadi saat proses pengelasan berlangsung.

Berdasarkan uji *Analysis of Variance* (ANOVA), diketahui bahwa kecepatan pengelasan memberikan pengaruh pada nilai kekerasan sebesar 24,08% pada daerah *base metal*, 20,09% pada daerah *heat affected zone* (HAZ), dan 0% pada daerah *weld metal*. Sedangkan arus memberikan pengaruh pada nilai kekerasan sebesar 75,92% pada daerah *base metal*, 79,91% pada daerah *heat affected zone* (HAZ), dan 100% pada daerah *weld metal*.

Berdasarkan hasil pengujian XRD yang ditampilkan pada gambar 4.54-4.57, grafik dari setiap spesimen memiliki bentuk

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



yang tidak jauh berbeda antara satu dan lainnya. Hal ini dikarenakan setiap spesimen pengujian berasal dari sumber yang sama yaitu SS316L berupa sebuah plat besar yang kemudian dipotong dan diberikan variasi pengelasan yang berbeda-beda. Selain untuk mengidentifikasi fasa utama, pengujian XRD juga digunakan untuk mencari adanya cacat yang muncul pada pengelasan SS 316L yaitu presipitasi karbida dan fasa sigma. Hasil difraktogram pada semua sampel yang ditunjukkan pada tabel 4.6 kemudian dicocokkan menggunakan aplikasi Match! 3 menunjukkan bahwa mayoritas fasa utama pada setiap sampel adalah Fe. Selain itu, pada hasil juga tidak ditemukan presipitasi karbida maupun fasa sigma. Hal ini terjadi akibat proses pendinginan yang cepat setelah pengelasan dilakukan sehingga presipitasi karbida maupun fasa sigma tidak mempunyai cukup waktu untuk terbentuk. Maka dari itu, dapat dikatakan bahwa semua parameter las yang diberikan pada penelitian kali ini bisa diimplementasikan.

Dengan melihat hasil pengujian dan observasi di atas, maka variasi arus dan kecepatan pengelasan yang dilakukan pada penelitian kali ini mempengaruhi bentuk struktur mikro serta sifat kekerasan SS 316L. Parameter kecepatan pengelasan 12 cm/menit dengan arus 100 A menghasilkan produk lasan yang paling memadai dibanding parameter lainnya.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tentang pengaruh variasi arus dan kecepatan pengelasan TIG terhadap struktur mikro dan kekerasan baja tahan karat SS 316L, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin tinggi arus dan semakin kecil kecepatan pengelasan yang diberikan maka menghasilkan struktur mikro yang lebih kasar. Sedangkan semakin kecil arus dan semakin tinggi kecepatan pengelasan maka menghasilkan struktur mikro yang lebih halus.
2. Nilai kekerasan pada daerah las mulai dari yang tertinggi sampai yang terendah adalah *weld metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *base metal*. Nilai kekerasan paling tinggi didapatkan pada variasi kecepatan pengelasan 12 cm/min dengan arus 100 A.
3. Berdasarkan aspek teknis dan statistik menggunakan ANOVA, proses pengelasan dan variasi yang diberikan tidak menimbulkan cacat apapun pada struktur mikro seperti presipitasi karbida maupun fasa sigma sehingga tidak mempengaruhi sifat kekerasan dan ketahanan korosi pada spesimen las.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan penelitian serta kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Dibutuhkan pengujian mekanik selain uji kekerasan untuk mengetahui pengaruh pengelasan pada sifat mekanik SS 316L.
2. Dibutuhkan peningkatan *range* terhadap *heat input* dengan jarak yang signifikan.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1999. **AWS A 5.22 Specification for Stainless Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding and Gas Tungsten Arc Welding**. America: American Welding Society.
- _____. 1999. **AWS A 5.9 Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods**. America: American Welding Society.
- ASM International. 1992. **ASM Metals Handbook Volume 13 9th Edition**. ASM International.
- Avner, Sidney H. 1997. **Introduction to Physical Metallurgy**. New York: McGraw Hill.
- Callister Jr., W. D., & Rethwisch, D. G. 2013. **Materials Science and Engineering : An Introduction, 9th Edition**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Dadang. 2013. **Teknik Las GTAW**. Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.
- DED. 2000. **Gas Tungsten Arc Welding Course**. Germany: German Development Service.
- Fadhil, Muhammad. 2016. **Pengaruh Variasi Heat Input terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro pada Pengelasan Baja SUS 316 dan 316L dengan Metode GTAW**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Fajri, Muhammad H. A. dkk. 2013. **Studi Pengaruh Masukan Panas Pengelasan GTAW terhadap Bentuk Hasil Lasan dan Struktur Mikro SS 316L**. Jakarta: Universitas Indonesia
- Messler, Robert W. 1999. **Principle of Welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy**. New Jersey: John Wiley and Sons
- Moslemi, Navid. dkk. 2015. **Effect of Current on Characeristic for 316 Stainless Steel Welded Joint Including**

- Microstructure and Mechanical Properties.** Johor: Universiti Teknologi Malaysia
- Outokompu. 2013. **Handbook of Stainless Steel.** Sweden: Outokompu.
- Suherman, Wahid. 1999. **Ilmu Logam II.** Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
- Suwarno. 2005. **Investigasi Derajat Presipitasi Karbida Krom pada Baja Tahan Karat Austenitik terhadap Pengamatan Makro.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Villanueva, D. M. E. dkk. 2006. **Comparative Study on Sigma Phase Precipitation of Three Types of Stainless Steels: Austenitic, Superferritic, and Duplex.** Sao Paulo: Politecnica da Universidade de Sao Paulo
- Wiryosumarto, Harsono dan Okumura, T. 2000. **Teknologi Pengelasan Logam.** Jakarta: Pradnya

LAMPIRAN

Lampiran 1

Data Uji Kekerasan

Tabel 1 Data uji kekerasan SS 316L dengan kecepatan pengelasan 12 cm/min

Parameter		Pengujian	Kekerasan (HV)		
<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Arus (A)		<i>Base Metal</i>	<i>HAZ</i>	<i>Weld Metal</i>
12	80	1	148,0	162,5	165,9
		2	150,0	168,6	179,1
		3	150,5	170,5	173,3
		Rata-rata	149,5	167,2	172,8
	90	1	146,5	149,4	156,0
		2	153,3	155,1	174,2
		3	152,2	149,5	156,5
		Rata-rata	150,7	151,3	162,2
	100	1	161,6	166,0	228,1
		2	153,2	159,0	214,7
		3	159,9	170,2	200,8
		Rata-rata	158,2	165,1	214,5
	110	1	145,1	153,3	153,7
		2	155,1	157,5	166,6
		3	147,2	151,9	156,1
		Rata-rata	149,1	154,2	158,8

Tabel 2 Data uji kekerasan SS 316L dengan kecepatan pengelasan 18 cm/min

Parameter		Pengujian	Kekerasan (HV)		
<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Arus (A)		<i>Base Metal</i>	<i>HAZ</i>	<i>Weld Metal</i>
18	80	1	133,4	153,2	189,5
		2	140,5	154,6	166,6
		3	144,2	157,4	170,2
		Rata-rata	139,4	155,1	175,4
	90	1	140,8	150,3	172,1
		2	151,0	158,1	176,2
		3	149,8	159,6	187,1
		Rata-rata	147,2	156,0	178,5
	100	1	152,1	155,5	181,9
		2	155,7	165,8	178,8
		3	162,0	158,8	174,5
		Rata-rata	156,6	160,0	178,4
	110	1	142,3	146,7	177,4
		2	140,5	155,5	171,4
		3	137,6	151,7	168,8
		Rata-rata	140,1	151,3	172,5

Tabel 3 Data uji kekerasan SS 316L dengan kecepatan pengelasan 24 cm/min

Parameter		Pengujian	Kekerasan (HV)		
<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Arus (A)		<i>Base Metal</i>	<i>HAZ</i>	<i>Weld Metal</i>
24	80	1	140,4	151,5	202,6
		2	154,8	159,6	174,7
		3	150,0	152,6	170,9
		Rata-rata	148,4	154,6	182,7
	90	1	139,2	141,8	160,3
		2	150,8	153,8	177,7
		3	139,0	154,5	164,0
		Rata-rata	143,0	150,0	167,3
	100	1	146,6	144,7	167,6
		2	136,8	142,6	159,2
		3	141,4	145,0	173,9
		Rata-rata	141,6	144,1	166,9
	110	1	143,7	158,3	171,7
		2	137,4	159,1	173,8
		3	146,6	150,3	181,9
		Rata-rata	142,6	155,9	175,8

Lampiran 2

Data Perhitungan Heat Input

Perhitungan *Heat Input* menggunakan rumus di bawah ini:

$$H = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{V}$$

Dimana H = *Heat Input* (HI) (kJ/mm)
 E = Tegangan (Volt)
 I = Arus (Ampere)
 V = Kecepatan pengelasan (mm/s)
 η = Efisiensi pengelasan (TIG=0,6)

Sehingga didapatkan *heat input* sebagai berikut:

Tabel 4 Perhitungan *heat input* SS 316L

Parameter		Tegangan (V)	<i>Heat Input</i> (kJ/mm)
<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Arus (A)		
12	80	10	0,24
	90		0,27
	100		0,30
	110		0,33
18	80		0,16
	90		0,18
	100		0,20
	110		0,22
24	80		0,12
	90		0,14
	100		0,15
	110		0,17

Lampiran 3

Data Perhitungan Lebar HAZ

Perhitungan lebar HAZ menggunakan rumus di bawah ini:

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4.13 \rho C t Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_o}$$

Dimana

C	= 0.5 J/g ⁰ C
ρ	= 0.008 g/mm ³
t	= 5 mm
To	= 25 °C
Tm	= 1600 °C
Tp	= 600 °C

Dan perhitungan angka konstan

$$4,13 \times \rho \times C = 3,13 \times 0.008 \times 0.5 = 0.0826$$

Sehingga didapatkan lebar HAZ sebagai berikut:

Tabel 5 Perhitungan lebar HAZ SS 316L

Parameter		Tegangan (V)	Lebar HAZ
<i>Travel Speed</i> (cm/min)	Arus (A)		
12	80	10	3,21
	90		3,61
	100		4,01
	110		4,41
18	80		2,14
	90		2,41
	100		2,67
	110		2,94
24	80		1,60
	90		1,87
	100		2,01
	110		2,27

Lampiran 4

Peak List Hasil Uji XRD

Travel Speed 12 cm/min Arus 80 A

Peak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.0117	2311.86	0.1020	2.05577	100.00
44.1435	1282.68	0.0612	2.05503	55.48
51.1365	508.74	0.1224	1.78481	22.01
74.9836	257.70	0.1020	1.26559	11.15

Travel Speed 12 cm/min Arus 90 A

Peak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.9577	1907.90	0.0816	2.05817	100.00
44.0878	1074.73	0.0612	2.05750	56.33
51.1073	552.68	0.0816	1.78576	28.97
51.2555	251.32	0.0816	1.78537	13.17
74.9701	436.16	0.1428	1.26578	22.86
75.1956	192.04	0.1020	1.26568	10.07

Travel Speed 12 cm/min Arus 100 APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.9572	2888.54	0.0816	2.05819	100.00
44.0801	1552.16	0.0612	2.05784	53.73
44.8378	39.10	0.2448	2.01979	1.35
51.0908	419.68	0.1020	1.78630	14.53
74.9494	170.52	0.0816	1.26608	5.90

Travel Speed 12 cm/min Arus 110APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.4289	10.62	0.8029	8.48263	0.46
43.9490	2287.90	0.1020	2.05855	100.00
44.0810	1187.12	0.0612	2.05780	51.89
44.8811	48.79	0.2448	2.01794	2.13
51.0786	525.98	0.0816	1.78670	22.99
51.1975	375.84	0.0612	1.78726	16.43
74.9308	173.43	0.1224	1.26635	7.58

Travel Speed 18 cm/min Arus 80 APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.9261	2344.99	0.1020	2.05958	100.00
44.0497	1343.14	0.0612	2.05919	57.28
51.0576	515.72	0.1020	1.78738	21.99
53.5059	38.22	0.1224	1.71123	1.63
74.8972	182.99	0.1020	1.26684	7.80

Travel Speed 18 cm/min Arus 90APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.9516	3333.16	0.1020	2.05844	100.00
44.0767	1748.79	0.0612	2.05799	52.47
51.0794	643.02	0.1020	1.78667	19.29
51.2444	324.07	0.0612	1.78573	9.72
74.9289	139.07	0.2040	1.26638	4.17

Travel Speed 18 cm/min Arus 100APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21.8953	12.88	0.3346	4.05944	0.48
43.9263	2661.87	0.0816	2.05957	100.00
44.0505	1413.00	0.0612	2.05915	53.08
51.0603	384.28	0.1020	1.78729	14.44
74.9160	233.34	0.0816	1.26657	8.77

Travel Speed 18 cm/min Arus 110 APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.2530	14.30	0.8029	8.62777	0.68
43.9385	2118.33	0.1020	2.05902	100.00
44.0654	1223.87	0.0612	2.05849	57.78
51.0351	601.59	0.1020	1.78812	28.40
74.9120	162.71	0.1224	1.26662	7.68

Travel Speed 24 cm/min Arus 80 APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.9273	4435.12	0.0816	2.05952	100.00
44.0503	2328.67	0.0612	2.05916	52.51
51.0911	879.01	0.0816	1.78629	19.82
51.2240	475.47	0.0612	1.78639	10.72
74.9253	334.05	0.0816	1.26643	7.53
75.1394	157.57	0.1020	1.26649	3.55

Travel Speed 24 cm/min Arus 90 APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.9259	2950.74	0.0816	2.05959	100.00
44.0549	1586.47	0.0612	2.05896	53.77
51.0548	491.62	0.1224	1.78747	16.66
74.9141	181.69	0.1020	1.26659	6.16
75.1381	119.94	0.1224	1.26337	4.06

Travel Speed 24 cm/min Arus 100 APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.9254	2611.66	0.0816	2.05961	100.00
44.0548	1362.82	0.0612	2.05896	52.18
51.0668	593.96	0.0816	1.78708	22.74
51.2130	316.91	0.0612	1.78675	12.13
74.9139	424.37	0.1224	1.26660	16.25
75.1433	222.68	0.0816	1.26644	8.53

Travel Speed 24 cm/min Arus 110 APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.5681	7.08	0.5353	8.37128	0.29
43.9290	2449.32	0.0816	2.05945	100.00
44.0508	1447.83	0.0612	2.05914	59.11
51.0576	474.53	0.1224	1.78738	19.37
74.9262	257.64	0.0816	1.26642	10.52

Weld Metal Sampel Travel Speed 12 cm/min Arus 100 APeak List: (*Bookmark 3*)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.5316	403.23	0.1673	2.07904	92.52
50.8274	240.53	0.1338	1.79642	55.19
74.6169	435.84	0.2342	1.27195	100.00

Lampiran 5

Hasil Uji *Analysis of Variance* (ANOVA)

Nested ANOVA: Base Metal versus Travel Speed (cm/min); Arus (A)

Analysis of Variance for Base Metal

Source	DF	SS	MS	F	P
Travel Speed (cm/min)	2	138,5450	69,2725	2,269	0,159
Arus (A)	9	274,8150	30,5350		
Total	11	413,3600			

Variance Components

Source	Var Comp.	% of Total	StDev
Travel Speed (cm/min)	9,684	24,08	3,112
Arus (A)	30,535	75,92	5,526
Total	40,219		6,342

Expected Mean Squares

1 Travel Speed (cm/min)	1,00(2) + 4,00(1)
2 Arus (A)	1,00(2)

Nested ANOVA: Heat Affected Zo versus Travel Speed (cm; Arus (A)

Analysis of Variance for Heat Affected Zone (HAZ)

Source	DF	SS	MS	F	P
Travel Speed (cm/min)	2	138,0200	69,0100	2,005	0,190
Arus (A)	9	309,7200	34,4133		
Total	11	447,7400			

Variance Components

Source	Var Comp.	% of Total	StDev
Travel Speed (cm/min)	8,649	20,09	2,941
Arus (A)	34,413	79,91	5,866
Total	43,062		6,562

Expected Mean Squares

1 Travel Speed (cm/min)	1,00(2) + 4,00(1)
2 Arus (A)	1,00(2)

**Nested ANOVA: Weld Metal versus Travel Speed (cm/min);
Arus (A)**

Analysis of Variance for Weld Metal

Source	DF	SS	MS	F	P
Travel Speed (cm/min)	2	33,0417	16,5208	0,069	0,934
Arus (A)	9	2170,5250	241,1694		
Total	11	2203,5667			

Variance Components

Source	Var Comp.	% of Total	StDev
Travel Speed (cm/min)	-56,162*	0,00	0,000
Arus (A)	241,169	100,00	15,530
Total	241,169		15,530

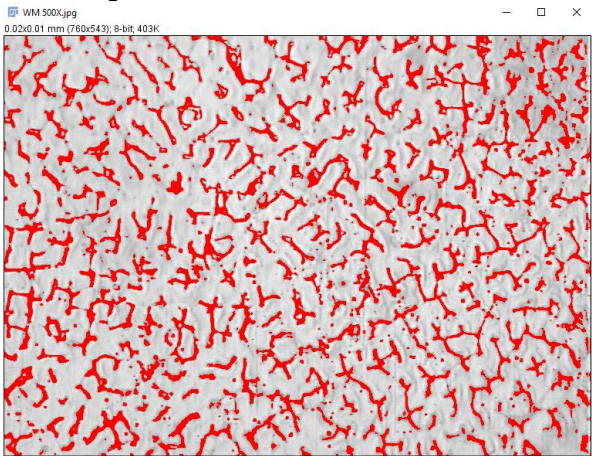
* Value is negative, and is estimated by zero.

Expected Mean Squares

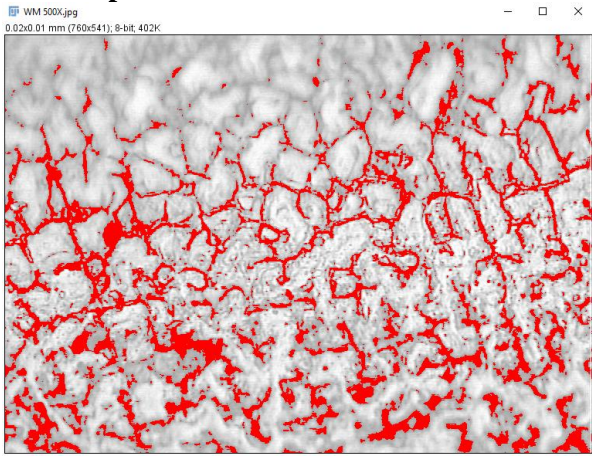
1	Travel Speed (cm/min)	1,00(2) + 4,00(1)
2	Arus (A)	1,00(2)

Lampiran 6
Gambar Analisa Aplikasi ImageJ

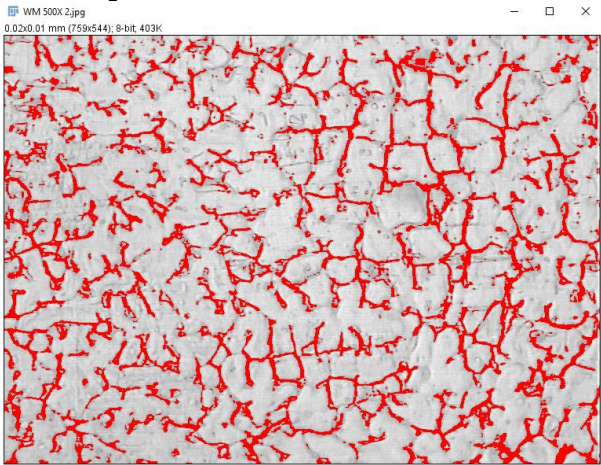
Travel Speed 12 cm/min Arus 80A



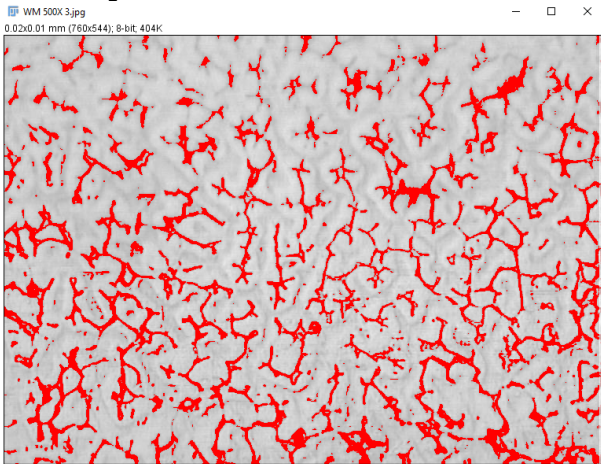
Travel Speed 12 cm/min Arus 90A



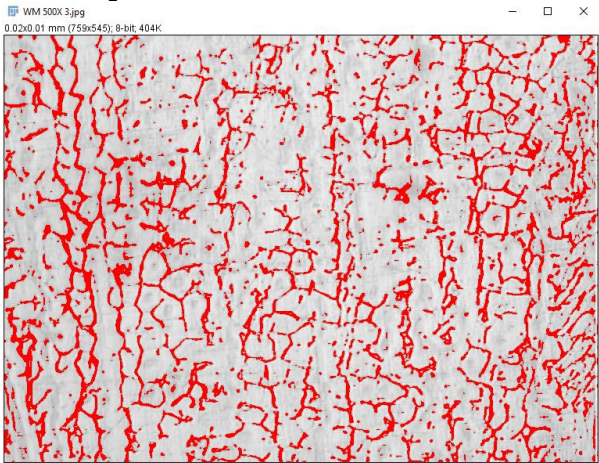
Travel Speed 12 cm/min Arus 100A



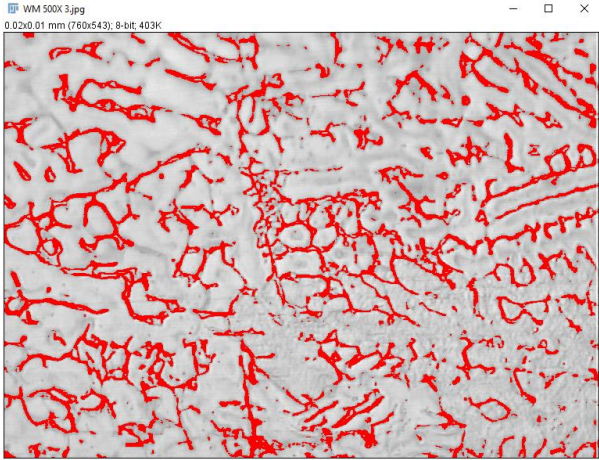
Travel Speed 12 cm/min Arus 110A



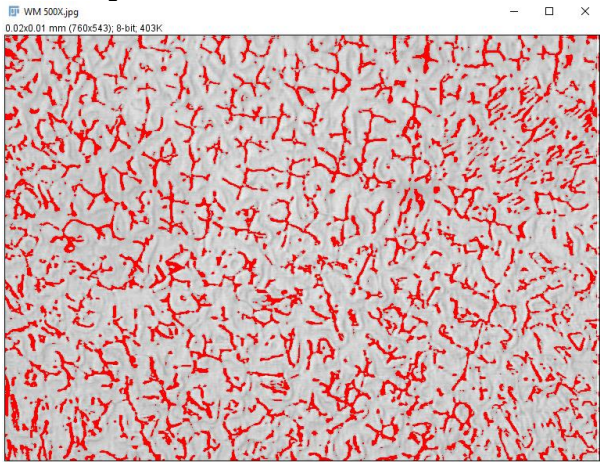
Travel Speed 18 cm/min Arus 80A



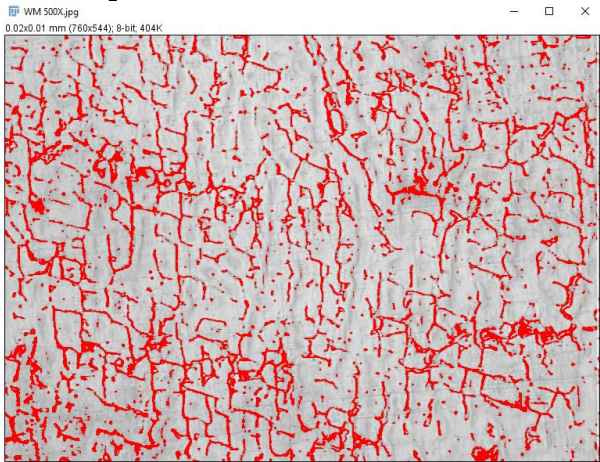
Travel Speed 18 cm/min Arus 90A



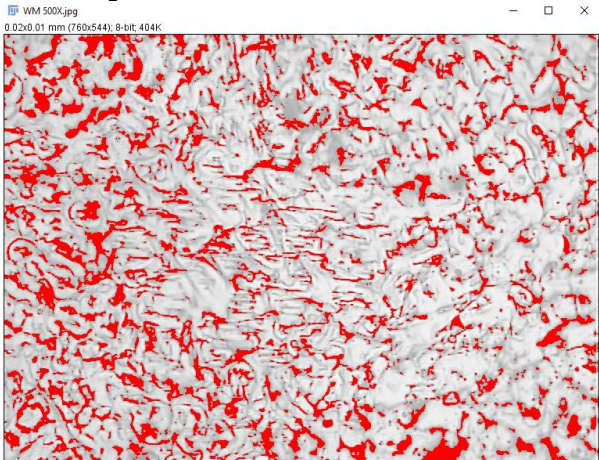
Travel Speed 18 cm/min Arus 100A



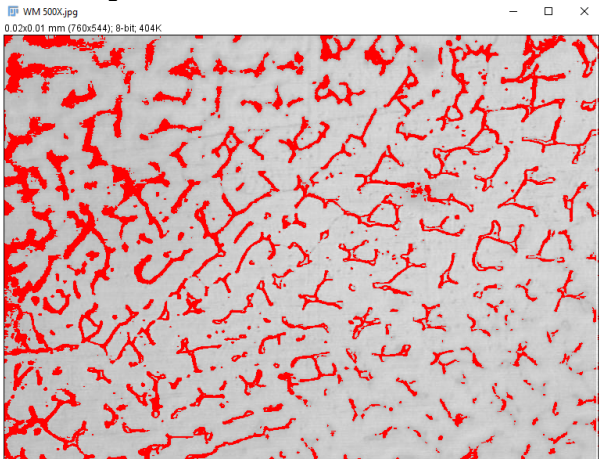
Travel Speed 18 cm/min Arus 110A



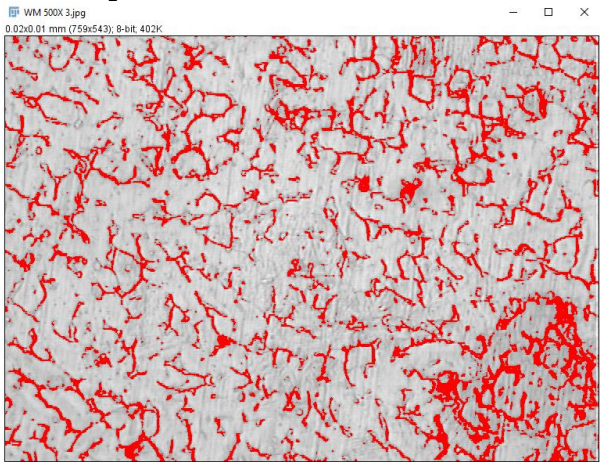
Travel Speed 24 cm/min Arus 80A



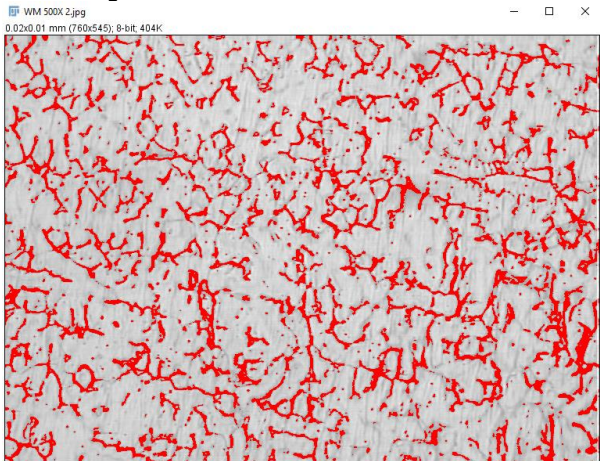
Travel Speed 24 cm/min Arus 90A



Travel Speed 24 cm/min Arus 100A



Travel Speed 24 cm/min Arus 110A



Lampiran 7

Sertifikat Material

INSPECTION CERTIFICATE

NISSHIN STEEL CO., LTD.
KINURA WORKS

Page: 1

Commodity: HOT ROLLED STAINLESS STEEL STRIP

Customer: _____

Specification: ASTM A 240

Shipper: _____

Type: 316L

Contract No: SD33289

Customer's Certificate No: (1)

Factory Order No: S-10-04-700-0152

Certificate No: 1604111240101

Date: APRIL 30, 2016

Surface Finish: NO. 1

Others: _____

Item	Grade	Coil No.	Heat No.	Size (mm)	Quantity (kg)	Chemical Composition (%)									
						C	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Others	
01	316L	ENG194C	ENG194C	5.0X1212XC	4642	0.027	0.70	0.03	0.033	0.003	10.11	16.48	2.01	0.01	
02	316L	ENG194C	ENG194C	5.0X1212XC	4642	0.027	0.70	0.03	0.033	0.003	10.11	16.48	2.01	0.01	

Item	Tensile Test				Hardness Test		SHAPE, KANDRES DIMENSION (END)	
	UTS (MPa)	YTS (MPa)	ELONGATION (%)	REDUCTION OF AREA (%)	HRB	HRC	SHAPE	KANDRES DIMENSION
01	508	208	58	78	80	79	GOOD	79
02	508	208	58	78	80	79	GOOD	79

HE8028039
SD33289

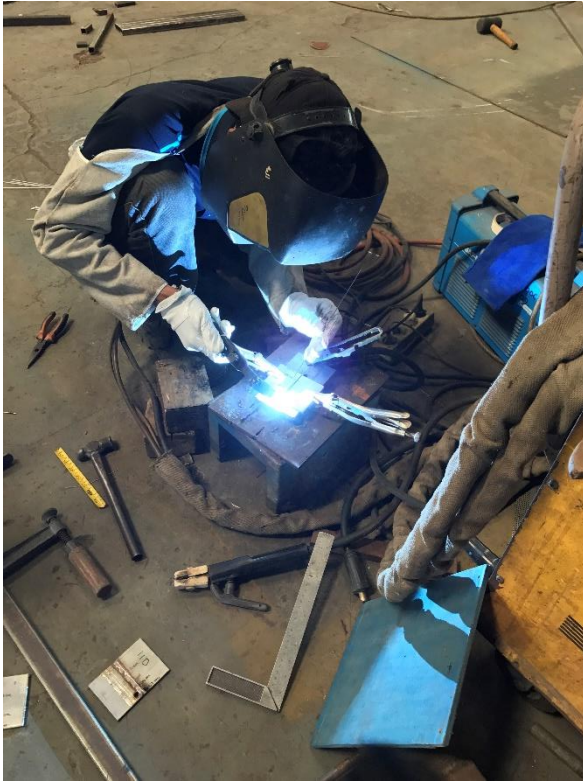
01330-01
E-01-FW -480

Remarks:
SOLUTION HEAT TREATMENT
... 1080°C X 5.0 MIN W.O.
ASTM A240/ASME SA240
EN10204 3.1 (2004)

We hereby certify the above statement to be true and correct every detail.
Nishin Steel Co., Ltd., Kinura Works.
M. Fujimura
Quality Control Manager: Masaru Fujimura

Lampiran 8

Foto Proses Pengelasan



Lampiran 9
Foto Spesimen Setelah Pengelasan



BIODATA PENULIS



Fakhri Aulia Abdillah lahir di Bontang, Kalimantan Timur pada hari Kamis, 24 Agustus 1995. Penulis merupakan putra sulung Bapak Muhaimin dan Ibu Wiwin Winarti dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di TK YPVDP Bontang, SD YPVDP Bontang, SMP YPVDP Bontang, dan SMA YPVDP Bontang. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan perguruan tingginya di Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2013.

Selama berkuliah di ITS, penulis juga aktif di beberapa kegiatan ekstrakurikuler, diantaranya di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS sebagai Staff Departemen Dalam Negeri (2014-2015) dan Ketua Himpunan (2015-2016), di Jamaah Masjid Manarul Ilmi (JMMI) ITS sebagai Staff Badan Pelayanan Ummat (2014-2015), serta di LDJ Ash-Haabul Kahfi sebagai Staff Departemen Syiar (2014-2015). Prestasi yang pernah diraih penulis selama masa perkuliahan adalah terdapatnya proposal Program Mahasiswa Wirausaha (PMW) oleh LP2KHA ITS pada tahun 2015. Masa perkuliahan penulis diakhiri dengan melakukan penelitian Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Variasi Arus dan Kecepatan Pengelasan TIG Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Baja Tahan Karat SS 316L.”

Pengalaman kerja yang pernah diikuti penulis yaitu kerja praktek di *Pipeline Inspection Service* TOTAL E&P INDONESIA Balikpapan pada bulan Juni hingga Agustus 2016, serta di *Inspection Section Technical Department* Badak LNG Plant Site Bontang pada bulan Agustus hingga September 2017. Penulis dapat dihubungi melalui 082352365926 dan email fakhriaulia95@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)